



• САНКТ-ПЕТЕРБУРГ •
• МОСКВА •
• КРАСНОДАР •
2016

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

ГИДРАВЛИКА И ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Учебное пособие



• САНКТ-ПЕТЕРБУРГ •
• МОСКВА • КРАСНОДАР •
2016

ББК 30.123я73

Г 46

Г 46 Гидравлика и гидравлические машины. Лабораторный практикум: Учебное пособие. — СПб.: Издательство «Лань», 2016. — 352 с.: ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература).

ISBN 978-5-8114-2157-2

Лабораторный практикум состоит из следующих разделов: гидравлика, гидравлические машины и водоснабжение.

В каждом разделе представлены лабораторные работы по основным теоретическим вопросам раздела. Лабораторные работы включают цель, краткое изложение основных сведений по теме работы, описание лабораторной установки, порядок выполнения работы и обработки опытных данных, контрольные вопросы для самопроверки.

В приложении даны справочные материалы, перечень использованной и рекомендуемой литературы.

Практикум предназначен для студентов высших учебных заведений по группе направлений подготовки «Сельское, лесное и рыбное хозяйство», а также может быть полезен для студентов других направлений подготовки при освоении учебных дисциплин по гидравлике.

ББК 30.123я73

Рецензенты:

П. И. ГАДЖИЕВ — доктор технических наук, профессор, декан факультета энергетики и охраны водных ресурсов Российского государственного аграрного заочного университета;

И. А. УСПЕНСКИЙ — доктор технических наук, профессор Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева.

Обложка

Е. А. ВЛАСОВА

© Издательство «Лань», 2016

© Коллектив авторов, 2016

© Издательство «Лань»,

художественное оформление, 2016

ПРЕДИСЛОВИЕ

Лабораторный практикум «Гидравлика и гидравлические машины» предназначен для подготовки бакалавров по укрупненной группе направлений подготовки «Сельское, лесное и рыбное хозяйство», а также может быть использован при изучении курса «Гидравлика» или «Гидравлика и гидравлические машины» другими техническими направлениями подготовки и специальностями как учебное пособие при выполнении лабораторно-практических работ по соответствующему курсу.

Практикум содержит описание и методику проведения лабораторных работ, иллюстрирующих законы равновесия и движения жидкостей, испытаний гидравлических машин, контрольные вопросы и тесты для проверки знаний студентов.

В приложении даны справочные материалы, перечень использованной и рекомендуемой литературы, которые могут быть использованы студентами для более глубокого изучения отдельных вопросов курса.

В зависимости от объема читаемого в вузе курса гидравлики, а также от возможностей гидравлической лаборатории, в план проведения лабораторных работ могут быть включены либо все лабораторные работы, либо часть из приведенных.

Описание каждой лабораторной работы состоит из четырех основных частей: цель лабораторной работы; общие сведения по теме, которой посвящена работа; порядок выполнения работы и обработки опытных данных; контрольные вопросы.

Общие сведения даны кратко и освещают содержание темы только в пределах лабораторной работы.

Методика и порядок проведения лабораторных работ описаны в практикуме с расчетом на самостоятельное выполнение студентами полного объема работы. Для обеспечения самостоятельности при проведении работы и хорошего усвоения материала необходимо, чтобы состав группы, при котором проводится работа на экспериментальной установке, не превышал четырех-пяти студентов.

Предполагается, что учебно-вспомогательным персоналом лаборатории проводится подготовка экспериментальных установок к работе и контроль за их работой во время опытов.

Описание каждой лабораторной работы в практикуме дано отдельно, по возможности без ссылок на предыдущие или последующие работы, поэтому последовательность выполнения работ может отличаться от предложенной в практикуме.

Изложение материала в лабораторном практикуме предусматривает возможность использования его в качестве учебного пособия для студентов-заочников, самостоятельно изучающих курс гидравлики.

Материал, приведенный в лабораторном практикуме, направлен на практическое закрепление теоретического освоения дисциплины «Гидравлика», в результате чего студент должен знать основные положения статики и динамики жидкости, составляющие основу расчета гидравлических систем; устройство и принцип действия гидравлических машин; уметь применять средства измерения основных гидравлических параметров; использовать нормативные и справочные документы; применять полученные знания и навыки при изучении специальных дисциплин; владеть методами расчета гидравлических систем и подбора гидромеханического оборудования; навыками выполнения гидравлических исследований, обработки и анализа их результатов.

Перечисленные результаты освоения дисциплины являются основой для формирования у будущих специалистов общекультурных (способность к самоорганизации и самообразованию), общепрофессиональных (способность решать инженерные задачи с использованием основных законов механики, электротехники, гидравлики, термодинамики и теплообмена; способность проводить и оценивать результаты измерений) и профессиональных (готовность к обработке результатов экспериментальных исследований; способность осуществлять сбор и анализ исходных данных для расчета и проектирования; готовность к участию в проектировании технических средств и технологических процессов производства, систем электрификации и автоматизации сельскохозяйственных объектов; готовность к профессиональной эксплуатации машин и технологического оборудования и электроустановок) компетенций.

Лабораторный практикум основан на многолетнем опыте преподавания дисциплины «Гидравлика» и смежных с ней учебных дисциплин на кафедре «Теплотехника, гидравлика и энергообеспечение предприятий» Института механики и энергетики им. В. П. Горячкина ФГБОУ ВО Российский государственный аграрный университет — МСХА им. К. А. Тимирязева.

Содержание лабораторного практикума соответствует примерной рабочей программе дисциплины «Гидравлика» и Федеральному государственному образовательному стандарту высшего профессионального образования.

Авторы выражают глубокую благодарность рецензентам за те ценные замечания и советы, которые они дали в процессе подготовки рукописи к изданию, а также будут признательны всем, кто пришлет свои отзывы и предложения по улучшению содержания лабораторного практикума.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ПОДГОТОВКЕ И ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ И ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ

Цель выполнения лабораторных работ — закрепить знания, полученные студентами на лекционных занятиях или в ходе самостоятельной работы, по соответствующим темам (разделам) путем экспериментальной проверки основных теоретических положений изучаемого курса гидравлики.

При проведении лабораторных работ студент должен иметь свой персональный журнал для выполнения лабораторных работ, который он оформляет в отдельной тетради или на листах формата А4, скрепленных и подшитых в отдельную папочку. Наличие одного журнала на двух и более студентов при выполнении лабораторной работы недопустимо. Форма лабораторного журнала представлена на рисунке 1. Каждый студент самостоятельно оформляет выполненную им лабораторную работу и защищает ее, ответив устно или письменно на контрольные вопросы по теме работы.

Перед началом конкретной лабораторной работы студент должен самостоятельно уяснить: содержание работы, последовательность выполнения наблюдений и измерений, методику обработки экспериментальных данных. Общие сведения по теме, приведенные в начале каждой работы, изложены в лабораторном практикуме кратко, конспективно, с расчетом на то, что поставленная в лабораторной работе тема теоретически изучена и усвоена студентами на лекционных занятиях или самостоятельно. Если материал темы не усвоен или недостаточно усвоен, то студенту рекомендуется ознакомиться с ним подробнее по соответствующему разделу курса.

Перед проведением лабораторной работы преподаватель проверяет степень усвоения студентами материала темы, которой посвящена лабораторная работа, а также наличие подготовленного к работе лабораторного журнала. Ксерокопии чужих журналов с частично или полностью выполненной работой недопустимы. Неподготовленные студенты к выполнению лабораторной работы не допускаются.

происходит из-за несоответствия размерностей подставляемых в уравнения (формулы) величин.

Во всех расчетах рекомендуется использовать размерности, принятые Международной системой единиц измерения (СИ). В отдельных случаях для удобства расчетов допускается использование внесистемных единиц.

Если определенный опытным путем тот или иной гидравлический параметр может быть вычислен по теоретической или эмпирической формуле, то полученный опытный результат надо сравнить с вычисленным по формуле и рассчитать абсолютную (относительную) ошибку измерений.

Все наблюдения, измерения и вычисления во время опыта проводятся студентом самостоятельно в присутствии лаборанта кафедры и ведущего преподавателя.

Преподаватель со своей стороны контролирует проведение опыта, обработку полученного материала и принимает выполненную студентом работу.

При сдаче лабораторной работы студент должен дать качественную оценку результатов своей работы, сделать выводы по работе, ответить письменно или устно на контрольные вопросы.

После окончания работы студент должен убрать свое рабочее место, сдать лаборанту все выданные ему инструменты, приборы и материалы.

Студенты, выполнившие лабораторную работу, но не предоставившие отчет по ней, к выполнению следующих работ не допускаются.

Отработка пропущенных (невыполненных по каким-либо причинам) лабораторных работ осуществляется студентами самостоятельно во внеучебное время в соответствии с утвержденным на кафедре графиком отработки лабораторных работ.

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕЖДУНАРОДНОЙ СИСТЕМЕ ЕДИНИЦ ИЗМЕРЕНИЯ (СИ)

1 января 1963 г. Государственным стандартом 9867-61 в нашей стране введена как предпочтительная международная система единиц измерения (сокращенное обозначение в русском написании СИ, в латинском SI). В стандарт включены 6 основных, 2 дополнительных и 27 важнейших производных единиц СИ.

В гидравлических расчетах из шести основных единиц измерения, перечисленных в ГОСТ 9867-61, используются три, а именно:

- длина, единица измерения — метр (м);
- масса, единица измерения — килограмм (кг);
- время, единица измерения — секунда (с).

Из дополнительных единиц измерения в гидравлических расчетах употребляется:

- угол, единица измерения — радиан (рад).

Из числа производных единиц в гидравлических расчетах используются приведенные в таблице 1.

Т а б л и ц а 1

Наименование	Единицы измерения
1. Площадь	1 м ²
2. Объем	1 м ³
3. Скорость	1 м/с
4. Ускорение	1 м/с ²
5. Угловая скорость	1 рад/с
6. Сила	1 Н (Ньютон)
7. Давление, напряжение	1 Н/м ²
8. Модуль упругости, модуль объемного сжатия	1 Н/м ²
9. Плотность	1 кг/м ³
10. Удельный вес	1 Н/м ³
11. Динамическая вязкость	1 Н·с/м ²
12. Кинематическая вязкость	1 м ² /с
13. Работа, энергия	1 Дж (1 Джоуль = 1 Н × 1 м)
14. Мощность	1 Вт (1 Ватт = 1 Дж/с)

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

При проведении лабораторных работ, целью которых является получение численных значений той или иной гидравлической характеристики (скорости, расхода, глубины и т. п.) немаловажными являются такие вопросы: как провести измерения и как оценить их точность?

Измерением какой-либо величины называется операция, в результате которой мы узнаем, во сколько раз измеряемая величина больше (или меньше) соответствующей величины, принятой за эталон (единицу измерения). Все измерения можно разбить на два типа: прямые и косвенные.

Прямые — это такие измерения, при которых определяется непосредственно интересующая нас физическая величина (масса, длина, интервалы времени, изменение температуры и т. д.).

Косвенные — это такие измерения, при которых интересующая нас величина определяется (вычисляется) из результатов прямых измерений других величин, связанных с ней определенной функциональной зависимостью. Например, измерение плотности тела по измерениям массы и объема тела и т. д.

Общая черта измерений — невозможность получения истинного значения измеряемой величины, результат измерения всегда содержит какую-то ошибку (погрешность). Объясняется это как принципиально ограниченной точностью измерения, так и природой самих измеряемых объектов. Поэтому, чтобы указать, насколько полученный результат близок к истинному значению, вместе с полученным результатом указывают ошибку измерения.

При проведении измерений могут иметь место ошибки трех видов:

- грубые ошибки — следствие описок, просчетов, неправильного использования измерительных приборов; несоответствие размерностей величин при подсчетах и т. п.;
- системные погрешности — вследствие неточности используемых контрольно-измерительных приборов (смещение места нуля, наличие воздуха в подводящих трубках пьезометра и т. п.);

- случайные погрешности — неточности отсчетов в ту или другую сторону, неизбежно допускаемые наблюдателем.

Ошибки первых двух видов могут быть сведены к минимуму при соответствующем внимании исполнителя, контроле записей и выверке инструментов.

Снижение величины ошибок третьего вида достигается проведением повторных измерений.

Обычно при проведении учебных лабораторных работ ограничиваются двух-трехкратными замерами величин и определяют среднеарифметический результат.

Оценка ошибок необходима, так как не зная их величины, нельзя сделать определенных выводов из проведенного эксперимента.

При оценке результатов проведенного эксперимента обычно рассчитывают абсолютную и относительную ошибки.

Абсолютной ошибкой Δx называется разность между истинным значением измеряемой величины μ и результатом измерения x , взятая по модулю, т. е.

$$\Delta x = |\mu - x|.$$

Относительной ошибкой δ называется отношение абсолютной ошибки к истинному значению измеряемой величины:

$$\delta = \frac{|\mu - x|}{\mu} \cdot 100\%,$$

где δ — относительная ошибка, %; μ — величина параметра, определенная расчетным путем (истинное значение измеряемой величины); x — величина параметра, определенная экспериментально.

Чтобы сделать вывод, насколько величина параметра, определенная расчетным путем (истинное значение измеряемой величины), соответствует определенной экспериментально (измеренной прямым или косвенным методом), в конце каждой лабораторной работы необходимо рассчитать относительную ошибку и оценить качество проведенных измерений.

При выполнении учебных лабораторных работ допустимая максимальная величина относительной ошибки принимается равной не более 10%.

Таким образом, если в результате обработки экспериментальных данных величина относительной ошибки составила

менее 10%, то можно констатировать, что расчетные зависимости позволяют с высокой точностью определить величину искомого гидравлического параметра и что измерения при выполнении лабораторной работы были проведены качественно.

Если относительная ошибка составила более 10%, то исполнителю (студенту, выполнявшему измерения и проводившему обработку экспериментальных данных) предлагается еще раз повторить эксперимент, акцентировав его внимание на более точном снятии показаний с контрольно-измерительных приборов и обработке полученных данных.

ИНСТРУКЦИЯ ПО ОХРАНЕ ТРУДА ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

1. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ ОХРАНЫ ТРУДА

1.1. К работе в лаборатории допускаются лица, не имеющие отклонений от нормы в состоянии здоровья или временного ухудшения (недомогания).

1.2. Пребывание обучающихся в помещении лаборатории допускается только в присутствии заведующего лабораторией или преподавателя кафедры.

1.3. В лаборатории необходимо проявлять осторожность, соблюдать порядок и чистоту на рабочем месте.

1.4. Запрещается использовать и хранить в помещении лаборатории легковоспламеняющиеся, ядовитые и взрывоопасные вещества.

1.5. В специально отведенном месте лаборатории должны находиться средства противопожарной безопасности (огнетушители) и медицинская аптечка.

1.6. Каждый лабораторный стенд должен находиться в исправном состоянии. Не допускается наличия масел и грязи.

1.7. В случае травмирования обучающихся, а также неисправности оборудования, инструмента и приспособления, о случившемся необходимо сообщить заведующему лабораторией, инженеру или преподавателю кафедры.

1.8. Соблюдение требований настоящей инструкции обязательно для всех лиц, находящихся или выполняющих работы в лабораториях кафедры «Теплотехника, гидравлика и энергообеспечение предприятий»; работающий несет личную и дисциплинарную ответственность за несоблюдение правил охраны труда.

2. ТРЕБОВАНИЯ ОХРАНЫ ТРУДА ПЕРЕД НАЧАЛОМ РАБОТЫ

2.1. Приступать к выполнению лабораторных работ только после инструктажа преподавателя на рабочем месте.

2.2. Проверить состояние рабочего места: наличие необходимых инструментов, приборов, учебных пособий для данной работы.

2.3. Не загромождать рабочее место, освободить его от ненужных предметов и материалов.

2.4. Перед выполнением лабораторной работы тщательно изучить ее описание, уяснить методику ее выполнения.

2.5. При обнаружении каких-либо неисправностей в состоянии используемых приборов, установок, недоброкачества посуды необходимо прекратить подготовку к работе и поставить в известность инженера, заведующего лабораторией или преподавателя кафедры.

3. ТРЕБОВАНИЯ ОХРАНЫ ТРУДА ВО ВРЕМЯ РАБОТЫ

3.1. Необходимо выполнять только ту работу, которая предусмотрена заданием или поручена преподавателем.

3.2. Быть внимательным, дисциплинированным, осторожным; точно выполнять указания преподавателя; необходимые испытания выполнять согласно методике их проведения.

3.3. Запрещается покидать рабочее место без разрешения преподавателя, хождение по лаборатории воспрещается.

3.4. Запрещается включать источники электропитания без разрешения преподавателя.

3.5. Во время выполнения лабораторной работы необходимо следить за уровнем и не допускать перелива воды в напорных и сливных баках стендов.

3.6. Быть предельно осторожным при использовании в работе приборов, выполненных из стекла.

3.7. При обнаружении трещин или нарушении целостности стеклянных приборов поставить в известность об этом преподавателя.

3.8. В случае повреждения в процессе работы приборов, выполненных из стекла, осторожно, избегая порезов, собирать стекло, используя щетку и совок.

3.9. При использовании в работе установок, подключенных к электрической сети, не прикасаться к электрическим проводам, остерегаясь пробоя изоляции, не прикасаться к оголенным электрическим проводам, в случае обнаружения таковых немедленно поставить в известность преподавателя.

3.10. Приступая к выполнению лабораторной работы на испытательном стенде быть аккуратно одетым с заправленной одеждой, избегая тем самым попадания и возможного наматывания частей одежды (поясов, тесемок и т. д.) вращающимися деталями стенда. В случае попадания частей одежды на вращающиеся детали немедленно обесточить стенд, отключив его от сети.

3.11. Не останавливать (затормаживать) руками вращающиеся детали стенда. Регулировки стенда выполнять только при полной его остановке и обесточивании.

3.12. Во время работы испытательного стенда не облокачиваться, не садиться и не прислоняться к его подвижным частям.

3.13. При нахождении у испытательного стенда группы обучающихся обеспечить беспрепятственный доступ преподавателя к органам управления стендом.

4. ТРЕБОВАНИЯ ОХРАНЫ ТРУДА В АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

4.1. При возникновении аварийной ситуации (пожар, появление резких запахов) четко выполнять указания преподавателя и при необходимости эвакуироваться из помещения.

4.2. При обнаружении неисправности в электрических установках, находящихся под напряжением, немедленно отключить источник электропитания и сообщить об этом преподавателю.

4.3. При возникновении пробоя напорного трубопровода немедленно остановить работу испытательного стенда, перекрыть все подводящие напорные трубопроводы, сообщить о случившемся преподавателю.

4.4. При получении травмы или внезапном ухудшении самочувствия принять меры к оказанию первой медицинской помощи пострадавшему и немедленно сообщить преподавателю.

5. ТРЕБОВАНИЯ ОХРАНЫ ТРУДА ПО ОКОНЧАНИИ РАБОТЫ

5.1. Отключить силовое питание лаборатории.

5.2. Перекрыть краны, вентили, заглушки всех подводящих напорных трубопроводов.

5.3. Слить воду из емкостей и трубопроводов стендов.

5.4. Произвести уборку и привести в порядок рабочее место.

5.5. По окончании уборки рабочее место сдать инженеру кафедры или заведующему лабораторией. Лаборатория может быть оставлена только после приемки рабочего места и с разрешения преподавателя.

5.6. Уходя, выключить освещение лаборатории.

Часть 1

Гидростатика

Лабораторная работа № 1.1

ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТИ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучить теоретические сведения по теме лабораторной работы.
2. Определить опытным путем температуру, плотность, удельный вес, относительный вес и вязкость жидкостей.
3. Сравнить опытные величины со справочными, определить относительную ошибку измерений, сделать выводы по работе.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

Жидкость — физическое тело, обладающее легкой подвижностью частиц, текучестью и способностью изменять свою форму под воздействием внешних сил. Различают капельные жидкости (несжимаемые или мало сжимаемые) и газообразные (сжимаемые, в том числе пар). В курсе гидравлики предметом изучения являются капельные жидкости.

Физические свойства жидкости изучаются в курсе физики. На сегодняшний день известно более 30 свойств. Вместе с тем в гидравлике при решении различных задач широко используют такие физические характеристики жидких тел, как плотность, удельный вес, температурное расширение, сжимаемость, вязкость, текучесть, поверхностное натяжение, капиллярность.

Плотность однородной жидкости ρ — масса жидкости в единице объема:

$$\rho = \frac{m}{W}, \text{ кг/м}^3,$$

где m — масса, кг; W — объем, м³.

При изменении температуры и давления плотность жидкостей изменяется. Увеличение температуры приводит к уменьшению плотности и наоборот. Вода, в этом смысле, является жидкостью аномальной, поскольку ее максимальная плотность ($\rho_{\text{в}} = 1000 \text{ кг/м}^3$) имеет место только при $t = 4^\circ\text{C}$. При температурах бóльших или меньших 4°C , плотность воды уменьшается (рис. 1.1).

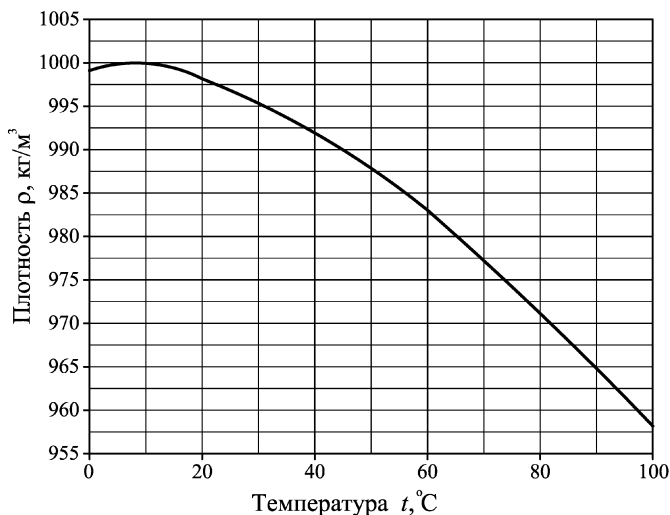


Рис. 1.1

Зависимость плотности воды от температуры

При значительных изменениях давления плотность капельных жидкостей изменяется незначительно.

Величина обратная плотности называется *удельный объем* $W_{\text{уд}}$ — объем, занимаемый единицей массы жидкости:

$$W_{\text{уд}} = \frac{W}{m} = \frac{1}{\rho}, \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Удельный (объемный) вес γ — вес единицы объема жидкости, т. е.

$$\gamma = \frac{G}{W} = \frac{m \cdot g}{\frac{m}{\rho}} = \rho \cdot g, \text{ Н/м}^3, \quad (1.1)$$

где G — вес жидкости, Н; g — ускорение свободного падения, м/с^2 .

Удельный вес дистиллированной воды, взятой при температуре $t = 4^\circ\text{C}$ равен $\gamma_{\text{в}} = 9810 \text{ Н/м}^3$.

Относительным весом δ называется отношение удельного веса данной жидкости к удельному весу дистиллированной воды, взятой при температуре 4°C :

$$\delta = \frac{\gamma_{\text{ж}}}{\gamma_{\text{в}}},$$

где $\gamma_{\text{ж}}$ — удельный вес жидкости, Н/м^3 .

Плотность и удельный вес капельных жидкостей определяется различными способами, в частности с помощью общающихся сосудов, ареометров, пикнометров.

Температурное расширение — свойство жидкости изменять свой объем в процессе ее изобарического нагрева (нагрева при постоянном давлении). Это свойство характеризуется *коэффициентом температурного расширения* β_t , выражающим относительное изменение ее объема при изменении температуры на 1°C и определяемым по формуле

$$\beta_t = \frac{1}{W_{\text{н}}} \cdot \frac{\Delta W}{\Delta t}, \text{ } ^\circ\text{C}^{-1},$$

где $W_{\text{н}}$ — начальный объем жидкости, м^3 ; ΔW — изменение объема жидкости, м^3 ; Δt — изменение температуры, $^\circ\text{C}$;

$$\Delta W = W_{\text{к}} - W_{\text{н}},$$

$W_{\text{к}}$ — конечный объем жидкости, м^3 .

Сжимаемость — свойство жидкости изменять свой объем при изменении давления. Это свойство характеризуется *коэффициентом объемного сжатия*, выражающим относительное изменение объема жидкости при изменении давления:

$$\beta_p = -\frac{1}{W_{\text{н}}} \frac{\Delta W}{\Delta p}, \text{ Па}^{-1},$$

где Δp — изменение давления, Па ;

$$\Delta p = p_2 - p_1,$$

где p_1 и p_2 — соответственно начальное и конечное давление, Па .

Знак минус обусловлен тем, что положительному приращению давления Δp соответствует уменьшение объема $W_{\text{н}}$.

Величина, обратная коэффициенту объемного сжатия, называется **модулем объемной упругости** жидкости:

$$E = \frac{1}{\beta_p}, \text{ Па.}$$

Вязкость — свойство жидкости оказывать сопротивление сдвигу или скольжению одного слоя жидкости относительно другого. Это свойство проявляется только при движении жидкости и не может быть обнаружено в состоянии покоя.

В результате действия сил внутреннего трения при движении в жидкости возникают касательные напряжения τ , величина которых равна

$$\tau = \pm \mu \frac{du}{dy},$$

где μ — коэффициент динамической вязкости; du/dy — градиент скорости, т. е. изменение скорости в направлении, перпендикулярном к направлению самой скорости; du — разность скоростей движения соседних соприкасающихся слоев жидкости в предположении, что слои бесконечно тонкие; u — мгновенная скорость слоя жидкости; dy — расстояние между соседними слоями жидкости (рис. 1.2).

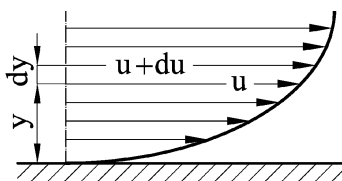


Рис. 1.2
Профиль скоростей при течении
вязкой жидкости вдоль стенки

Коэффициент динамической вязкости (динамический коэффициент вязкости или динамическая вязкость) $\mu = \tau \frac{dy}{du}$ представляет собой силу трения, приходящуюся на единицу поверхности, при градиенте скорости равном единице. В системе СИ μ измеряется в Па·с.

На практике наиболее часто пользуются не коэффициентом динамической вязкости μ , а его отношением к плотности жидкости, называемым *коэффициентом кинемати-*

ческой вязкости (кинематическим коэффициентом вязкости или кинематической вязкостью)

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}.$$

В системе СИ коэффициент кинематической вязкости измеряется в м²/с, на практике часто применяется единица измерения стокс 1 Ст = 1 см²/с.

Вязкость жидкостей зависит от температуры: с повышением температуры вязкость уменьшается. Влияние давления на вязкость жидкости проявляется в значительно меньшей степени. При давлениях до 20 МПа изменение вязкости жидкости в расчетах не учитывается.

Вязкость жидкостей измеряется специальными приборами — вискозиметрами.

Текучесть — способность жидкости принимать форму сосуда, в котором она находится.

Текучесть ζ определяется как величина обратная динамической вязкости:

$$\zeta = \frac{1}{\mu}, \frac{1}{\text{Па} \cdot \text{с}}.$$

Поверхностное натяжение жидкости обуславливается силами взаимного притяжения молекул поверхностного слоя, стремящихся сократить свободную поверхность жидкости. Искривление свободной поверхности жидкости называется **мениском**.

Поверхностное натяжение характеризуется *коэффициентом поверхностного натяжения* σ (Н/м), значение которого зависит от температуры и для различных жидкостей приводится в справочной литературе.

Особенно сильно поверхностное натяжение проявляется в трубках малого диаметра (капиллярах).

Возможны два случая искривления свободной поверхности жидкости: поднятие уровня (вогнутая поверхность), если жидкость смачивает стенки (например, вода) и опускание уровня (выпуклая поверхность), если жидкость не смачивает стенки (например, ртуть).

Способность жидкости подниматься или опускаться в трубках малого диаметра относительно уровня жидкости вне трубки под действием сил поверхностного натяжения называется **капиллярностью** (рис. 1.3).

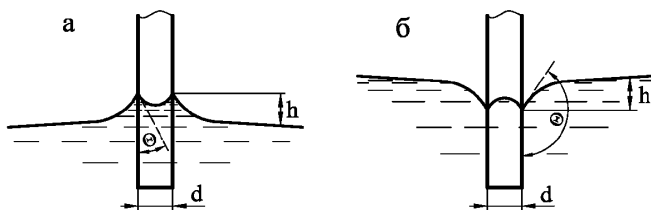


Рис. 1.3

Капиллярность смачивающей (а) и не смачивающей (б) жидкости

Высота поднятия или опускания мениска определяется по формуле

$$h = \frac{4\sigma \cdot \cos\Theta}{\rho \cdot g \cdot d},$$

где h — высота поднятия (опускания) мениска, м; d — диаметр трубки, м; Θ — краевой угол (угол смачивания). Для чистой воды и стекла

$$h = \frac{4\sigma}{\rho \cdot g \cdot d}.$$

Силы поверхностного натяжения необходимо учитывать при измерении гидростатического давления жидкостными приборами, при решении отдельных задач подземной фильтрации. При обычных гидравлических расчетах влияние этих сил ввиду их малости не учитывают.

ОПИСАНИЕ ПРИБОРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ (УДЕЛЬНОГО ВЕСА) И ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТЕЙ

Приборы для определения удельного веса и плотности жидкостей

Основными приборами для измерения удельного веса и плотности жидкости являются пикнометры, сообщающиеся сосуды, ареометры.

Пикнометр (от древнегреческих слов «плотный» и «измеряю») — физико-химический прибор, представляющий собой стеклянный сосуд специальной формы и определенной вместимости, применяемый для измерения плотности веществ (рис. 1.4). Пикнометр был изобретен Д. И. Менделеевым в 1859 г.

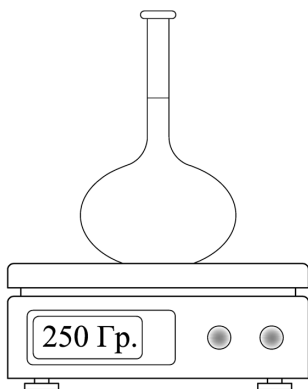


Рис. 1.4
Пикнометр

Измерение плотности пикнометром основано на взвешивании находящегося в нем вещества (обычно в жидком состоянии), заполняющего пикнометр до метки на горловине или до верхнего края капилляра, что соответствует номинальной вместимости пикнометра. Измерения объема значительно упрощаются, если вместо одной метки у пикнометра имеется шкала.

Пикнометры выпускаются на 20, 50, 100 мл и т. д. с отмериванием объема по нижнему уровню мениска. Возможная ошибка прибора указана в паспорте, случайные дополнительные ошибки могут быть вызваны неточностью установки температуры в объеме исследуемой жидкости, неточностью взвешивания (для пикнометра) или определения уровня жидкости. Обычно ошибка не превосходит $\pm 0,1\%$.

Пикнометр заранее тарируют на дистиллированной воде, для его взвешивания пользуются аналитическими весами. Пикнометр выдерживают в воде при температуре измерения 15–20 мин, излишек жидкости над отметкой убирают пипеткой. Вычисляют плотность по формуле:

$$\rho = \frac{m - m_0}{m_{\text{в}} - m_0} \rho_{\text{в}},$$

где m — масса пикнометра с исследуемой жидкостью при данной температуре; m_0 — масса сухого пикнометра; $m_{\text{в}}$ — масса пикнометра с водой; $\rho_{\text{в}}$ — плотность воды при данной температуре.

Основные достоинства пикнометрического метода определения плотности:

- высокая точность измерений (до 10^{-5} г/см³);
- возможность использования малых количеств вещества (0,5–100 см³);
- малая площадь свободной поверхности жидкости в пикнометре, что практически исключает испарение жидкости и поглощение влаги из воздуха;
- раздельное проведение операций термостатирования и последующего взвешивания.

Способ **сообщающихся сосудов** — один из доступных и простых способов определения удельного веса (плотности) (рис. 1.5). В соответствии с законом сообщающихся сосудов при одинаковом давлении на свободных поверхностях жидкостей высоты, отсчитываемые от поверхности раздела, обратно пропорциональны их удельным весам

$$\frac{\gamma_1}{\gamma_2} = \frac{h_2}{h_1}.$$

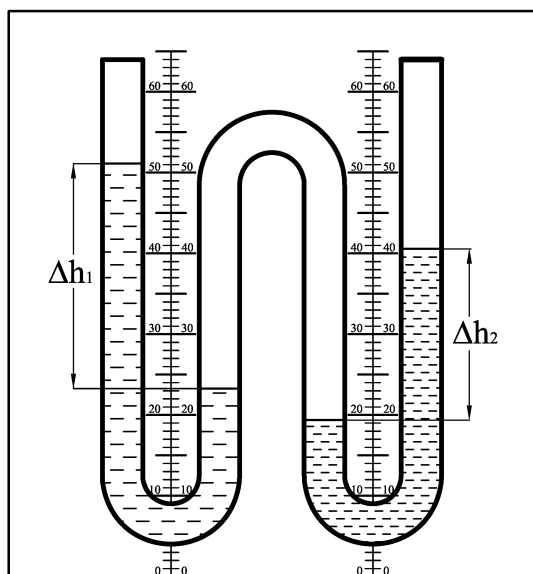


Рис. 1.5
Сообщающиеся сосуды

Зная удельный вес одной жидкости γ_1 , можно определить удельный вес другой жидкости:

$$\gamma_1 = \gamma_2 \cdot \frac{\Delta h_2}{\Delta h_1}.$$

Имея в виду взаимосвязь удельного веса и плотности $\gamma = \rho \cdot g$, с помощью сообщающихся сосудов можно определить плотность исследуемой жидкости:

$$\rho_1 = \rho_2 \cdot \frac{\Delta h_2}{\Delta h_1},$$

где γ_1 и ρ_1 — известные удельный вес и плотность, Н/м³ и кг/м³; Δh_1 — высота столба жидкости с известной плотностью, м; Δh_2 — высота столба исследуемой жидкости, м.

Если оба сообщающихся сосуда будут заполнены однородной жидкостью, то $\Delta h_1 = \Delta h_2$, т. е. высоты стояния жидкости в этих сосудах будут одинаковы. Это свойство используется при устройстве водомерных стекол для определения уровня жидкости в резервуарах, паровых котлах и т. д.

Принцип сообщающихся сосудов используется в жидкостных приборах для измерения давления.

Ареометр — прибор, принцип действия которого основан на законе Архимеда, представляет собой удлиненный пустотелый стеклянный цилиндр, состоящий из широкой нижней и узкой верхней частей (рис. 1.6а). Нижняя часть ареометра выполнена в виде полого корпуса цилиндрической формы, частично заполненного неподвижно закрепленным балластом, необходимым для того, чтобы ареометр при погружении в жидкость плавал строго в вертикальном положении, находясь при этом в устойчивом равновесии. Верхняя часть ареометра — стержень, представляющий собой тонкостенную цилиндрическую трубку круглого сечения с запаянным верхним концом. На внутреннюю поверхность стержня прикреплена шкала.

Ареометр погружают в сосуд с исследуемой жидкостью. Согласно закону Архимеда на него действует выталкивающая сила, равная весу вытесненной жидкости. По мере погружения ареометра выталкивающая сила возрастает, и в тот момент, когда эта сила становится равной весу ареометра, наступает состояние равновесия. Глубина погружения ареометра зависит от плотности (удельного веса) жидкости: чем больше плотность, тем меньше глубина погружения, и наоборот. Деление на ареометрической шкале, до

которого погружается ареометр, указывает значение плотности жидкости. Шкала ареометра не равномерна: деления шкалы, т. е. расстояние между двумя смежными штрихами, постепенно увеличиваются снизу вверх к концу стержня.

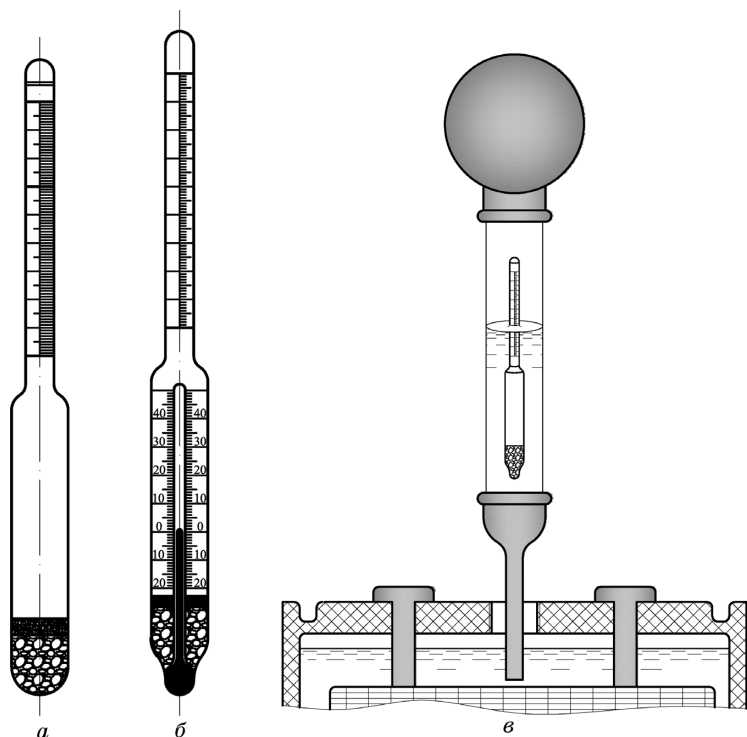


Рис. 1.6

Ареометр (а), термоареометр (б), ареометр для электролита (в)

Некоторые виды ареометров изготавливают со встроенным термометром, позволяющим одновременно с плотностью измерять и температуру жидкости. В этом случае жидкость, заполняющая резервуар термометра (ртуть, толуол), служит частью балласта ареометра. Такие приборы называются **термоареометрами** (рис. 1.6б).

Кроме ареометров общего назначения существуют и специальные ареометры, предназначенные для измерения плотности агрессивных жидкостей (кислот, электролита, этиленгликоля), молока, спирта, нефти и т. д. В частности ареометр для электролита представляет собой прозрачную

стеклянную колбу с длинным наконечником на одном ее конце и резиновым шаром на другом. Внутри данной колбы расположен обычный стеклянный ареометр (термоареометр) для измерения плотности электролита или поправки различной степени плавучести (рис. 1.6в).

Приборы для измерения вязкости ньютоновских жидкостей

Капиллярные вискозиметры (рис. 1.7) представляют собой U-образную трубку, в одно колено которой впаян капилляр 2, переходящий в расширение 1. Определение вязкости состоит в измерении времени протекания известного количества (объема) жидкости через капилляр при заданном перепаде давления.

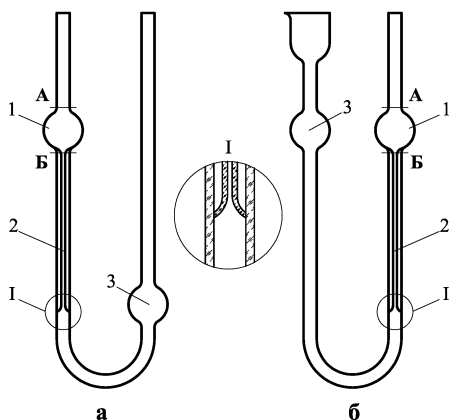


Рис. 1.7

Капиллярные вискозиметры:

a — Оствальда; *б* — Уббелюде; 1 — емкость для исследуемой жидкости;
2 — капилляр; 3 — емкость для жидкости, прошедшей через капилляр.

При этом кинематическая вязкость определяется по формуле:

$$\nu = \frac{g}{9,807} \cdot t \cdot K,$$

где g — ускорение свободного падения в месте измерения, м/с^2 ; 9,807 — нормальное ускорение свободного падения (ускорение свободного падения на уровне Мирового океана), м/с^2 ; t — время истечения, с; K — постоянная вискозиметра, $\text{мм}^2/\text{с}^2$.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ И ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

Определение плотности и удельного веса жидкости с помощью пикнометра

1. Пикнометр тщательно промыть хромовой смесью, затем водой. Ополоснуть дистиллированной водой, а затем спиртом. Такая промывка производится перед калибровкой пикнометра или при неравномерном смачивании пикнометра жидкостью.

2. Протереть пикнометр слегка увлажненным куском ткани или подуть на него для снятия статического заряда.

3. Подготовленный пикнометр взвесить на аналитических весах с погрешностью не более 0,0002 г, тем самым определив m_0 — массу сухого пикнометра.

4. Наполнить при помощи пипетки пикнометр дистиллированной свежeproкипяченной водой температурой 18–20°C немного выше метки, следя за тем, чтобы в пикнометр не попали пузырьки воздуха.

5. Заполненный пикнометр погрузить до горловины в термостат или баню с температурой 20°C и выдержать его при данной температуре не менее 30 мин.

6. Когда уровень воды в шейке пикнометра с меткой перестанет изменяться, избыток воды отобрать пипеткой или фильтровальной бумагой и вытереть шейку пикнометра внутри. Уровень воды в пикнометре установить по верхнему краю мениска.

7. Пикнометр с установленным уровнем воды при температуре 20°C тщательно вытереть снаружи безворсовой тканью, снять статический заряд и взвесить с точностью до 0,0002 г, определив этим m_v — массу пикнометра с водой.

8. Наполнить при помощи пипетки пикнометр жидкостью с неизвестной плотностью температурой 18–20°C немного выше метки, следя за тем, чтобы в пикнометр не попали пузырьки воздуха.

9. Заполненный исследуемой жидкостью пикнометр погрузить до горловины в термостат или баню с температурой 20°C и выдержать его при данной температуре не менее 30 мин.

10. Когда уровень исследуемой жидкости в шейке пикнометра с меткой перестанет изменяться, избыток жидкости

отобрать пипеткой или фильтровальной бумагой и вытереть шейку пикнометра внутри. Уровень жидкости в пикнометре установить по верхнему краю мениска.

11. Пикнометр с установленным уровнем исследуемой жидкости при температуре 20°C тщательно вытереть снаружи безворсовой тканью, снять статический заряд и взвесить с точностью до 0,0002 г, определив этим m — массу пикнометра с исследуемой жидкостью.

12. Вычислить плотность исследуемой жидкости при данной температуре (20°C):

$$\rho = \frac{m - m_0}{m_B - m_0} \rho_B,$$

где m — масса пикнометра с исследуемой жидкостью при данной температуре; m_0 — масса сухого пикнометра; m_B — масса пикнометра с водой; ρ_B — плотность воды при данной температуре.

13. Сравнить полученные результаты со справочными и сделать выводы по работе.

Т а б л и ц а 1.1

Таблица опытных данных

Наименование показателя	Обозначение	Единица измерения	Опыт	
			1	2
1. Температура	t	°C		
2. Масса сухого пикнометра	m_0	г		
3. Масса пикнометра с водой	m_B	г		
4. Масса пикнометра с исследуемой жидкостью	m	г		
5. Плотность дистиллированной воды при заданной температуре	ρ_B	кг/м ³		
6. Плотность исследуемой жидкости из опыта	$\rho = \frac{m - m_0}{m_B - m_0} \rho_B$	кг/м ³		
7. Плотность исследуемой жидкости по справочнику	$\rho_{\text{справ}}$	кг/м ³		
8. Относительная ошибка	δ	%		

Определение плотности и удельного веса жидкости с помощью сообщающихся сосудов

1. Измерить температуру исследуемой и известной жидкостей.

2. Налить в левое колено сообщающихся сосудов небольшое количество известной жидкости (рис. 1.8а).

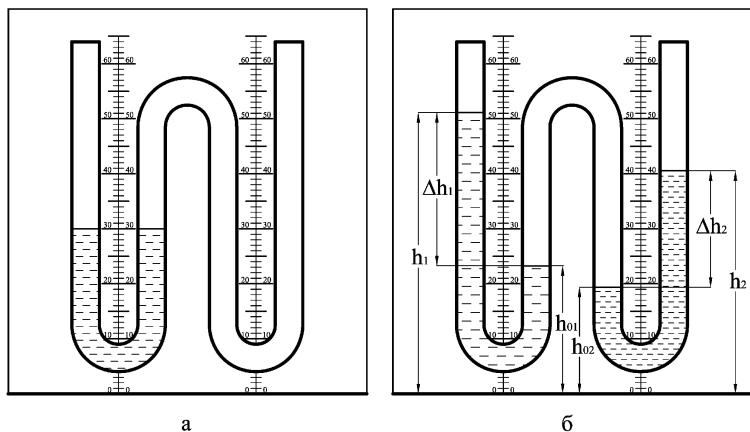


Рис. 1.8

Схема заполнения сообщающихся сосудов

3. Налить в правое колено сообщающихся сосудов исследуемую жидкость (рис. 1.8б).

4. Снять показания высот — h_{01} , h_1 , h_{02} , h_2 .

5. Рассчитать разность высот в коленах сообщающихся сосудов:

$$\Delta h_1 = h_1 - h_{01}; \quad \Delta h_2 = h_2 - h_{02}.$$

6. Определить, используя справочные таблицы, плотность известной жидкости при измеренной температуре.

7. Вычислить плотность и с учетом формулы (1.1) удельный вес исследуемой жидкости

$$\rho_2 = \rho_1 \frac{\Delta h_1}{\Delta h_2}; \quad \gamma_2 = \gamma_1 \frac{\Delta h_1}{\Delta h_2}.$$

8. По справочным таблицам найти плотность исследуемой жидкости при измеренной температуре.

9. Сравнить полученные результаты со справочными и сделать выводы по работе.

Т а б л и ц а 1.2

Таблица опытных данных

Наименование показателя	Обозначение	Единица измерения	Известная жидкость	Исследуемая жидкость
1. Температура	t	°С	—	—
2. Уровни жидкостей в коленях сообщающихся сосудов	h_{01}	см	—	—
	h_1	см	—	
	h_{02}	см	—	—
	h_2	см		—
3. Разность высот в коленях сообщающихся сосудов	$\Delta h_1 = h_1 - h_{01}$	см	—	—
	$\Delta h_2 = h_2 - h_{02}$	см	—	—
4. Плотность известной жидкости	ρ_1	кг/м ³	—	—
5. Плотность исследуемой жидкости из опыта	$\rho_{2\text{опыт}} = \rho_1 \frac{\Delta h_1}{\Delta h_2}$	кг/м ³	—	—
6. Удельный вес исследуемой жидкости из опыта	$\gamma_{2\text{опыт}} = \gamma_1 \frac{\Delta h_1}{\Delta h_2}$	Н/м ³	—	—
7. Плотность исследуемой жидкости по справочнику	$\rho_{2\text{справ}}$	кг/м ³	—	—
8. Относительная ошибка	δ	%	—	—

Определение плотности жидкости с помощью ареометра

1. Стекланный цилиндр, в который будет налита исследуемая жидкость, промыть теплой водой и насухо вытереть чистым полотенцем.

2. Сполоснуть цилиндр исследуемой жидкостью.

3. Налить в цилиндр исследуемую жидкость по стеклянной палочке, избегая ее вспенивания.

4. Тщательно перемешать жидкость стеклянной палочкой для удаления пузырьков воздуха.

5. Ареометр тщательно вымыть и насухо вытереть.

6. Медленно, вертикально погрузить ареометр в жидкость так, чтобы он не задевал стенок цилиндра.

7. После того как ареометр погрузится в жидкость на 3–5 мм выше отметки предполагаемой плотности, ареометр отпустить.

8. Погруженный в жидкость ареометр должен плавать вертикально и свободно, не соприкасаясь со стенками цилиндра, в течение 3–4 мин для выравнивания температуры (рис. 1.9).

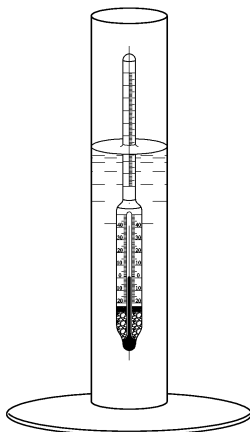


Рис. 1.9

Определение плотности термоареометром

9. Снять показания ареометра по нижнему краю мениска.

10. По справочным таблицам найти плотность исследуемой жидкости при измеренной температуре.

11. Сравнить полученные результаты со справочными и сделать выводы по работе.

Т а б л и ц а 1.3

Таблица опытных данных

Наименование показателя	Обозначение	Единица измерения	Опыт	
			1	2
1. Температура	t	°C		
2. Плотность исследуемой жидкости из опыта	$\rho_{\text{опыт}}$	кг/м ³		
3. Плотность исследуемой жидкости при данной температуре из справочника	$\rho_{\text{табл}}$	кг/м ³		
4. Относительная ошибка	δ	%		

Определение вязкости жидкости с помощью капиллярного вискозиметра Пинкевича (ВПЖ-4)

1. Заполнить вискозиметр исследуемой жидкостью согласно прилагаемой инструкции.
2. Установить вискозиметр в термостат и выдержать при заданной температуре не менее 15 мин.
3. С помощью резиновой груши (вакуум-насоса) засосать жидкость в колено 1 примерно до 1/3 высоты расширения 4 (рис. 1.10).

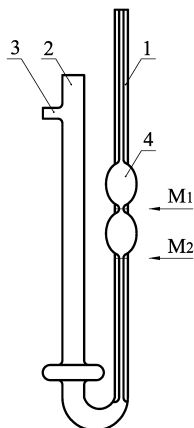


Рис. 1.10

Вискозиметр Пинкевича (ВПЖ-4):

1, 2 — колено; 3 — отводная трубка; 4 — расширения.

4. Отсоединить резиновую грушу (вакуум-насос) от колена 1.
5. Замерить время прохождения жидкости от метки M_1 до M_2 .
6. Определить значение коэффициента кинематической

вязкости $\nu = \frac{g}{9,807} \cdot t \cdot K$.

7. По справочным таблицам найти плотность исследуемой жидкости при измеренной температуре.

8. Рассчитать величину коэффициента динамической вязкости $\mu = \nu \cdot \rho_{\text{табл}}$.

9. Сравнить полученные результаты со справочными и сделать выводы по работе.

Таблица опытных данных

Наименование показателя	Обозначение	Единица измерения	Жидкость	
1. Температура	t	°C		
2. Плотность исследуемой жидкости при данной температуре из справочника	$\rho_{\text{табл}}$	кг/м ³		
3. Постоянная вискозиметра	K	мм ² /с ²		
4. Время замера	$t_{\text{в}}$	с		
5. Коэффициент кинематической вязкости	$\nu = \frac{g}{9,807} \cdot t \cdot K$	мм ² /с		
6. Коэффициент динамической вязкости	$\mu = \nu \cdot \rho_{\text{табл}}$	Па·с		

Контрольные вопросы

1. Какие физические свойства жидкости Вы знаете?
2. Дайте определение плотности, удельного и относительного веса жидкости.
3. Что такое температурное расширение и сжимаемость жидкости? Чем они характеризуются?
4. Дайте определение вязкости жидкости. Какими параметрами она характеризуется?
5. Какова связь динамической и кинематической вязкости, каковы их единицы измерения? Какими приборами определяется вязкость жидкости?
6. Что такое текучесть жидкости? Можно ли ее оценить количественно?
7. Какова природа явления поверхностного натяжения? От чего зависит коэффициент поверхностного натяжения?
8. Какие приборы используются для измерения плотности и удельного веса жидкости? Каков их принцип действия?
9. Что представляет собой ареометр?
10. Каков принцип действия капиллярного вискозиметра?
11. В каких единицах в системе СИ измеряются плотность, удельный вес, коэффициенты кинематической и динамической вязкости, коэффициенты объемного сжатия и температурного расширения?

Лабораторная работа № 1.2

ГИДРОСТАТИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучить теоретические сведения по теме лабораторной работы.
2. Измерить давление жидкости с помощью пьезометров и мановакуумметров, сделать выводы по работе.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

На жидкость, находящуюся в общем случае в относительном покое, действуют внешние *поверхностные* и *массовые* силы. Поверхностные силы действуют по внешней поверхности рассматриваемого объема жидкости и пропорциональны площади этой поверхности. Массовые силы (сила тяжести, силы инерции) пропорциональны массе или объему жидкости. В случае *абсолютного покоя* жидкости (неподвижной относительно Земли) из массовых сил действует только сила тяжести.

Под действием поверхностных и массовых сил внутри объема жидкости возникает напряжение, которое называют *давлением*. Гидростатическое давление в любой точке покоящейся жидкости представляет собой напряжение сжатия, возникающее под действием внешних сил:

$$p = \lim_{\Delta\omega \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta P}{\Delta\omega} \right),$$

где p — гидростатическое давление в точке; ΔP — нормальная сила сжатия, действующая на элементарную площадку $\Delta\omega$, содержащую данную точку.

Гидростатическое давление направлено по внутренней нормали к площадке действия, а его численное значение не зависит от ориентации площадки в пространстве и является функцией координат рассматриваемой точки:

$$p = f(x, y, z).$$

Единицей измерения давления в СИ является паскаль (Па): $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$.

Для практического применения более удобны кратные единицы — килопаскаль (кПа) и мегапаскаль (МПа): $1 \text{ кПа} = 10^3 \text{ Па}$; $1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па}$.

Широкое распространение получили и другие единицы измерения давления (табл. 1.5).

Т а б л и ц а 1.5

Единицы измерения давления

Единица давления	Па	бар	кгс/см ²	мм рт. ст.	м вод. ст.	Атмосфера техническая, ат.	Атмосфера физическая, атм
Па	1	10^{-5}	$1,02 \times 10^{-5}$	0,0075	$1,02 \times 10^{-4}$	$1,02 \times 10^{-5}$	$1,054 \times 10^{-5}$
бар	10^5	1	1,02	750	10,2	1,02	1,054
кгс/см ²	98 100	0,981	1	735,5	10	1	0,968
мм рт. ст.	133,32	$1,33 \times 10^{-3}$	$1,36 \times 10^{-3}$	1	0,0136	$1,36 \times 10^{-3}$	$1,32 \times 10^{-3}$
м вод. ст.	9810	0,0981	0,1	73,556	1	0,1	0,0968
Атмо- сфера техниче- ская, ат.	98 100	0,981	1	736	10	1	0,968
Атмо- сфера физиче- ская, атм	101 325	1,01	1,033	760	10,33	1,033	1

В практике расчетов применяются различные способы учета гидростатического давления. Если при определении давления учитывается атмосферное давление, действующее на свободную поверхность жидкости, давление называют *полным* или *абсолютным*. При измерении абсолютное давление отсчитывается от нуля.

Часто в расчетах атмосферное давление на поверхности жидкости не учитывается и определяется так называемое *манометрическое* или *избыточное* давление:

$$p_{\text{изб}} = p_{\text{абс}} - p_{\text{атм}}.$$

Абсолютное или полное давление, отсчитываемое от нуля, всегда положительно ($p_{\text{абс}} > 0$). Если полное давление меньше атмосферного, то недостаток давления до атмосферного называют *вакуумметрическим давлением* или *вакуумом* (разрежением):

$$p_{\text{вак}} = p_{\text{атм}} - p_{\text{абс}}.$$

Максимальное или предельное значение вакуума численно равно атмосферному давлению, т. е. $p_{\text{вак max}} = p_{\text{атм}}$. В инженерных расчетах за атмосферное давление принята одна техническая атмосфера $p_{\text{ат}} = 98\,100$ Па.

В случае абсолютного покоя жидкости ее свободная поверхность горизонтальна и *основное уравнение гидростатики* имеет вид

$$z + \frac{p}{\gamma} = \text{const},$$

где z — геодезическая высота, м, т. е. расстояние от произвольной горизонтальной плоскости сравнения до рассматриваемой точки; p — давление в точке, Па; γ — удельный вес жидкости, Н/м³; p/γ — высота, м, на которую поднимется жидкость под действием давления p . Эту высоту можно измерить, если к сосуду подсоединить закрытую трубку, из которой полностью удален воздух.

Если трубка открыта и давление на свободной поверхности равно атмосферному, жидкость поднимется на высоту, соответствующую избыточному давлению и называемую *пъезометрической высотой* $h_p = p_{\text{изб}}/\gamma$. Высота, соответствующая вакуумметрическому давлению, называется *вакуумметрической высотой* $h_{\text{вак}} = p_{\text{вак}}/\gamma$ (рис. 1.11а, б).

Каждый член основного уравнения гидростатики имеет линейную размерность. Принято сумму высот $z + p/\gamma$ называть *напором*. Если давление $p = p_{\text{абс}}$, то напор называют *гидростатическим*; если $p = p_{\text{изб}}$ — *пъезометрическим*, т. е.

$$H_{\text{ст}} = z + \frac{p_{\text{абс}}}{\gamma}; \quad H_p = z + \frac{p_{\text{изб}}}{\gamma}.$$

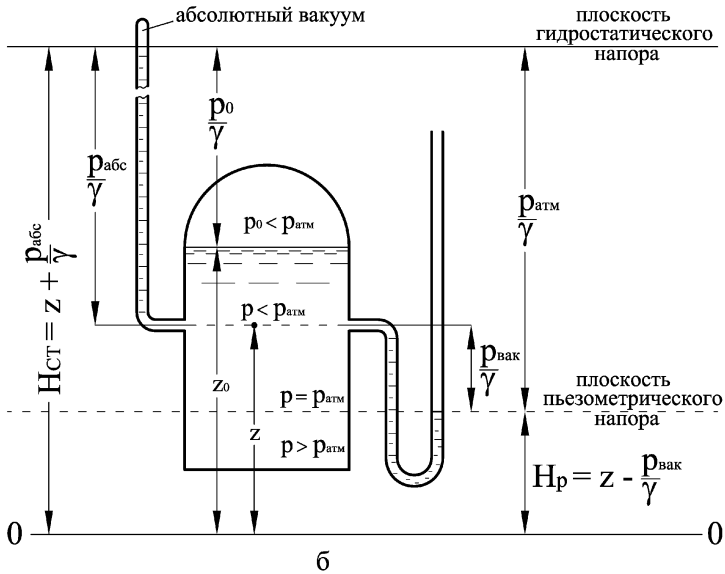
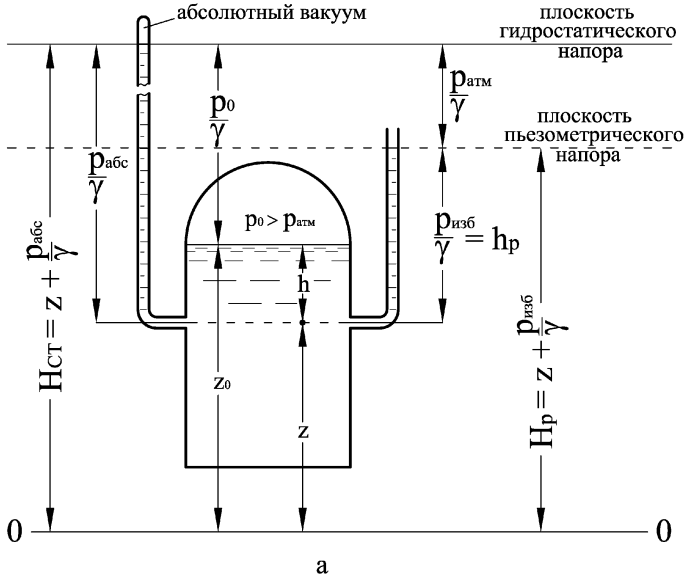


Рис. 1.11

К геометрической интерпретации основного уравнения гидростатики

Для произвольной точки и для точки на свободной поверхности жидкости абсолютное давление в точке определяется по следующей формуле

$$p_{\text{абс}} = p_0 + \gamma h,$$

где p_0 — давление на свободной поверхности жидкости (поверхностное или внешнее давление), Па; h — глубина погружения точки под уровень свободной поверхности, м; γh — весовое давление, т. е. вес столба жидкости высотой h с площадью поперечного сечения, равной единице, Па.

Величина давления может быть определена как путем непосредственного измерения (**метод прямых измерений**), так и посредством измерения другой физической величины (например, индуктивности, емкости, температуры кипения жидкости, скорости распространения ультразвука, теплопроводности и т. д.), функционально связанной с измеряемым давлением (**косвенный метод**).

Наибольшее распространение в технике измерения давления получил метод прямых измерений. Косвенный метод измерения давления применяется, если по тем или иным причинам неприменим прямой метод.

Существует множество разнообразных приборов для измерения давления жидкости, классифицирующихся по следующим признакам:

- по принципу действия;
- по виду измеряемого давления;
- по назначению (рис. 1.12).

По принципу действия приборы делят на жидкостные, деформационные, грузопоршневые и электрические.

Жидкостные приборы измеряют давление при помощи уравнивающего столба жидкости, заливаемой в прибор.

В деформационных приборах измеряемое давление определяют по деформации различных упругих чувствительных элементов (трубчатой пружины, мембраны, сильфона и др.).

В грузопоршневых приборах измеряемое давление уравнивается массой грузов, действующих на поршень определенного диаметра.

Классификация приборов по виду измеряемого давления представлена в таблице 1.6.

Манометры, вакуумметры и дифференциальные манометры, предназначенные для измерения небольших давлений, разрежений и разности давлений газовых сред (до 40 кПа), называют соответственно напоромерами, тягомерами и тягонапоромерами.

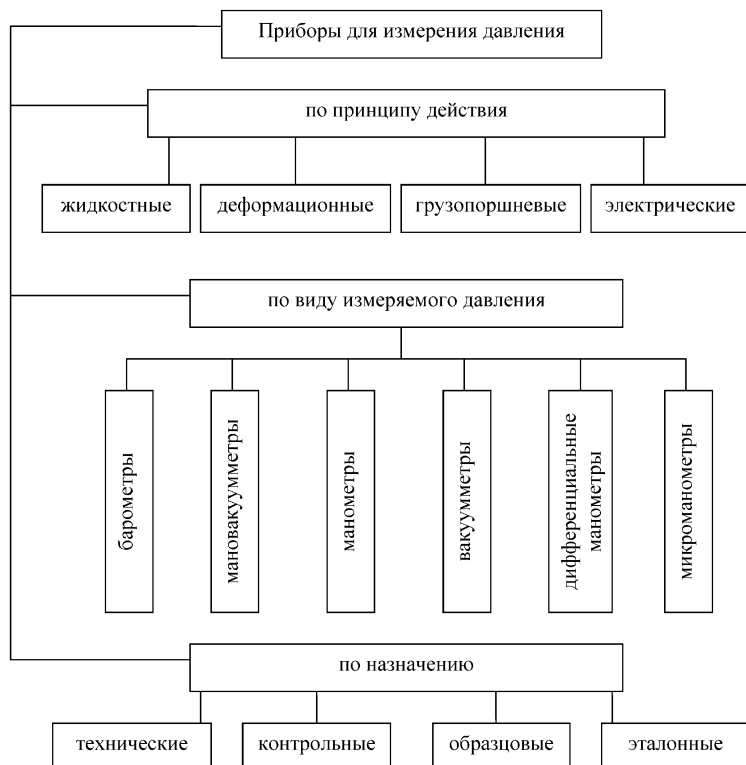


Рис. 1.12

Классификация приборов для измерения давления

Т а б л и ц а 1.6

Наименование прибора	Измеряемое давление
Барометры	Атмосферное (барометрическое)
Манометры	Избыточное (манометрическое)
Вакуумметры	Вакуумметрическое (разряжение, вакуум)
Мановакуумметры	Избыточное или вакуумметрическое
Дифференциальные манометры	Разность давлений
Микроманометры	Высокоточное измерение малых давлений (до 2,5 кПа)

По назначению приборы подразделяются на технические, контрольные, образцовые и эталонные (табл. 1.7).

Т а б л и ц а 1.7

Приборы	Назначение
Технические	Для измерения давления непосредственно в ходе производственного процесса, на рабочих местах
Контрольные	Для контроля за правильностью показаний технических приборов на месте их установки в производственных условиях
Образцовые	Для поверки технических и контрольных приборов в специальных лабораторных условиях
Эталонные	Для хранения размера единиц давления в целях единообразия, достоверности и высокой точности измерений давления

ЖИДКОСТНЫЕ ПРИБОРЫ

Принцип измерения давления приборами этого типа основан на условии равновесия жидкости в сообщающихся сосудах. Обычно прибор представляет собой U-образную стеклянную трубку, которая заполняется рабочей жидкостью. При измерении давления один конец трубки соединяется с сосудом или трубопроводом, другой — остается открытым. Величина давления соответствует разности высот жидкости в ветвях (коленах) трубки. Отсчет измерений может быть выполнен с точностью ± 1 мм высоты столба рабочей жидкости. Диаметр трубки должен быть не менее 5–6 мм. Ошибка измерения из-за капиллярности может быть уменьшена при применении трубок большего диаметра (10–15 мм для воды и 6–9 мм для ртути).

Основными преимуществами жидкостных приборов являются простота устройства, высокая точность, стабильность показаний и низкая стоимость, что обеспечило их широкое применение в лабораторной практике в виде рабочих и образцовых манометров для градуировки шкал и поверок других приборов.

К недостаткам этих приборов относится громоздкость, хрупкость конструкции, малые пределы измеряемого давления (напора), колебания уровня жидкости в обоих коленах часто затрудняют отсчет показаний. Для увеличения точности показаний приборы снабжаются специальными оптическими приспособлениями — нониусами.

Пьезометр — простейший прибор жидкостного типа, измеряет давление высотой столба той же жидкости, что и в резервуаре (рис. 1.13). В случае, когда давление на поверхности жидкости в резервуаре больше атмосферного ($p_0 > p_{\text{атм}}$) жидкость в пьезометре поднимется на некоторую высоту h_p . Абсолютное давление в точке подключения пьезометра определяется по формуле:

$$p_N = p_{\text{атм}} + \gamma h_p$$

и, следовательно, избыточное давление

$$p_{\text{изб}} = \gamma h_p.$$

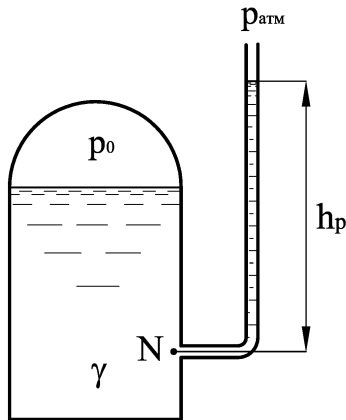


Рис. 1.13
Схема пьезометра

Таким образом, высота поднятия жидкости в пьезометре h_p — *пьезометрическая высота* характеризует *избыточное давление* в резервуаре и служит мерой для определения его величины.

Простейшим устройством для измерения вакуумметрического давления (вакуума) служит стеклянная трубка U-образной формы с открытым концом или перевернутая U-образная трубка, один конец которой опущен в резервуар с жидкостью (рис. 1.14):

$$p_{\text{вак}} = \gamma h_{\text{вак}}.$$

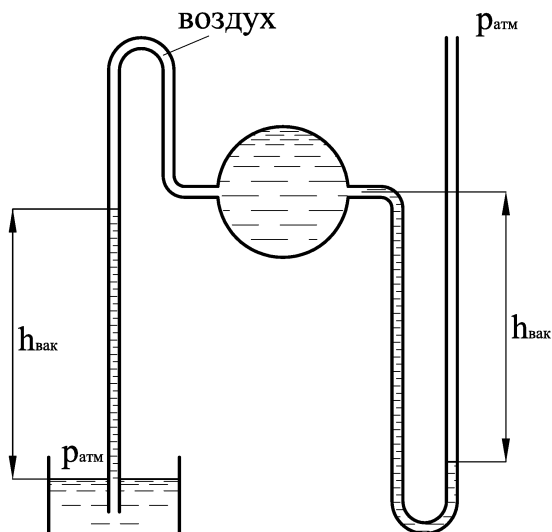


Рис. 1.14
Приборы для измерения вакуума

Расширить диапазон измеряемых давлений можно, если давление уравнивать не той же жидкостью, что находится в резервуаре, а жидкостью большего удельного веса. Обычно такой жидкостью является ртуть, так как $\gamma_{рт} > \gamma_в$ в 13,6 раза, поэтому при измерении одних и тех же давлений трубка оказывается значительно короче пьезометрической, прибор получается более компактным, и называют такой прибор ртутным манометром.

При измерении небольших давлений в качестве рабочих жидкостей используются также бромистый этилен, бромистый этил, тетрабромэтан и др.

Ртутный манометр представляет собой U-образную стеклянную трубку, изогнутое колено которой заполняется ртутью (рис. 1.15). Один конец трубки соединяется с областью, в которой необходимо измерить давление, а другой является открытым. До подключения манометра ртуть находится в обоих коленах на одном уровне.

Если в резервуаре давление манометрическое (рис. 1.15а), то уровень ртути в левом колене понизится, а в правом — повысится, при этом равновесие наступит в тот момент, когда наступит равенство давлений на горизонтальной поверхности равного давления.

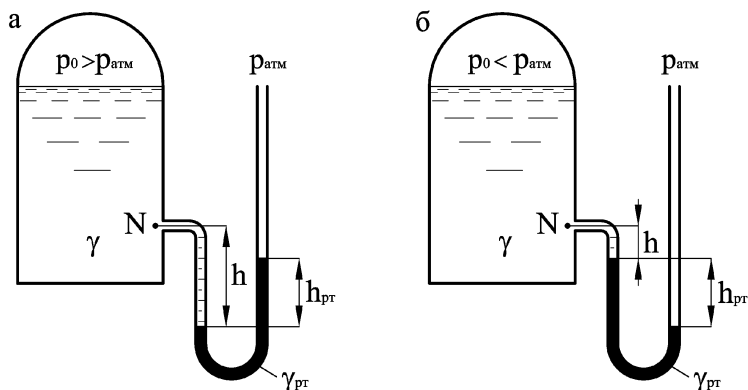


Рис. 1.15
Ртутный манометр

Абсолютное давление в точке подключения манометра:

$$p = p_{\text{атм}} + \gamma_{\text{рт}} h_{\text{рт}} - \gamma h,$$

избыточное давление

$$p_{\text{изб}} = \gamma_{\text{рт}} h_{\text{рт}} - \gamma h.$$

Если в резервуаре давление вакуумметрическое (рис. 1.15б), то после подключения ртутного манометра в левом колене ртуть поднимется, а в правом — понизится. Абсолютное давление в точке подключения манометра:

$$p_N = p_{\text{атм}} - \gamma_{\text{рт}} h_{\text{рт}} - \gamma h,$$

т. е. величина вакуумметрического давления

$$p_{\text{вак}} = \gamma_{\text{рт}} h_{\text{рт}} + \gamma h.$$

Величина давления γh незначительна и ею часто пренебрегают, определяя $p_{\text{вак}} = \gamma_{\text{рт}} h_{\text{рт}}$.

Высоту $h_{\text{вак}} = \frac{p_{\text{вак}}}{\gamma_{\text{рт}}}$, соответствующую вакууму в резер-

вуаре ($p_{\text{вак}} = p_{\text{атм}} - p$), называют *вакуумметрической высотой* $h_{\text{вак}}$. Таким образом, величину вакуума также можно измерять высотой столба рабочей жидкости.

Батарейный двухжидкостный манометр применяется для увеличения диапазона измеряемых давлений. Прибор состоит из двух-трех колен соединенных между собой U-образных трубок, нижняя часть которых заполняется ртутью,

а верхняя — той же жидкостью, что и в резервуаре, в котором измеряется давление. В зависимости от того, какое давление жидкости в резервуаре — манометрическое или вакуумметрическое, уровни ртути и жидкости в коленях соответствующим образом уравниваются (рис. 1.16).

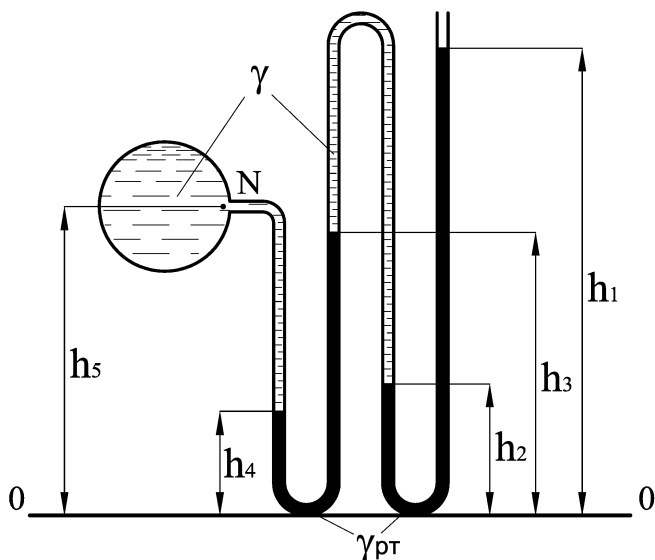


Рис. 1.16

Батарейный двухжидкостный манометр

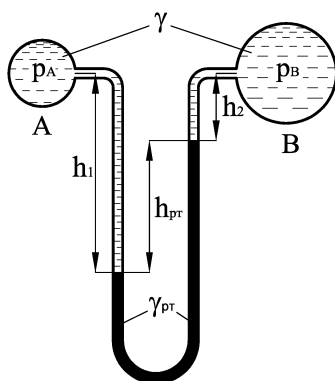


Рис. 1.17

Дифференциальный манометр

Расчет величины избыточного или вакуумметрического давления в точке N подключения прибора (рис. 1.16) производится от открытого конца трубки с учетом понятия поверхности равного давления: во всех точках горизонтальной плоскости, проведенной в однородной жидкости, гидростатические давления одинаковы:

$$p_{\text{изб}N} = \gamma_{\text{рт}}(h_1 - h_2) - \gamma(h_3 - h_2) + \gamma_{\text{рт}}(h_3 - h_4) - \gamma(h_5 - h_4).$$

Дифференциальный манометр (рис. 1.17) применяется для измерения разности давлений в двух резервуарах или в двух точках жидкости в одном и том же резервуаре.

Для схемы, приведенной на рисунке 1.17, разность давлений в резервуарах A и B определяется по формуле

$$p_A - p_B = h_{\text{рт}}(\gamma_{\text{рт}} - \gamma).$$

ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ПРИБОРЫ

Эти приборы широко применяют для измерения давления при ведении технологических процессов благодаря простоте устройства, удобству и безопасности в работе. Все деформационные приборы имеют в схеме какой-либо упругий элемент, который деформируется под действием измеряемого давления: трубчатую пружину, мембрану или сильфон.

Наибольшее применение получили приборы с трубчатой пружиной. Их выпускают в виде показывающих манометров и вакуумметров с максимальным пределом измерений.

Измерительная система манометра (рис. 1.18) состоит из полый тонкостенной (чаще всего латунной) изогнутой трубки 1, один конец которой запаян и соединен при помощи тяги 3 с зубчатым механизмом 2. Второй — открытый — конец трубки штуцером 4 присоединяется к той области, где должно производиться измерение давления. Под действием давления жидкости трубка (пружина) деформируется и посредством зубчатого механизма приводит в движение стрелку 5, по отклонению которой судят о величине давления. Градуировка шкалы в определенных единицах давления производится заводами-изготовителями.

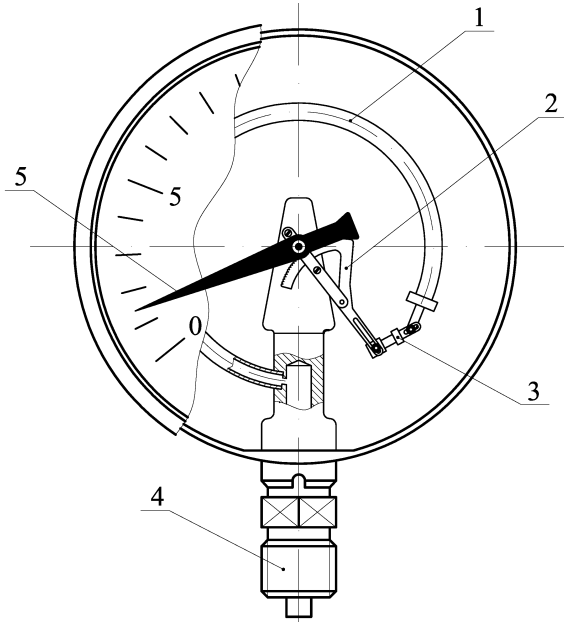


Рис. 1.18
Пружинный манометр

Обычно манометр имеет корпус, защищающий его от повреждений и засорений. Открытый конец трубки, являющейся главной рабочей частью прибора, впаян в основание манометра — толстостенную камеру с ниппелем и стойкой.

По типу описанного пружинного манометра изготавливают вакуумметры и мановакуумметры, а также контактные, контрольные и образцовые приборы.

Контактные приборы применяются для контроля, регулирования и управления давлением. Эти приборы применяются для дистанционной сигнализации (электрической, оптической или акустической) наибольшего и наименьшего допустимых значений давления; для дистанционного управления (включение — выключение управляющего органа); для регулирования и поддержания при помощи управляющего органа заданного рабочего режима.

Контрольные манометры служат для проверки правильности показаний рабочих манометров. Они имеют две трубчатые пружины, впаянные в общий держатель, и сообща-

ются одновременно с одним ниппелем. При исправной работе прибора показания обеих стрелок должны точно совпадать.

Образцовые манометры и вакуумметры представляют класс приборов высокой точности и используются в лабораториях для измерения давления и вакуума. Шкала имеет условные деления в угловых градусах с интервалом в 1° по окружности циферблата по дуге в 300° . Каждый прибор имеет свидетельство, в котором условные деления шкалы переведены в единицы давления.

С помощью пружинных манометров можно измерять давления в достаточно широком диапазоне (от 0,1 до 100 МПа).

Широкое применение, особенно при измерении небольших давлений (менее 1 МПа), нашли мембранные манометры, основным рабочим органом которых является волнистая (гофрированная) пластинка-мембрана 1, соединенная со стрелкой 2 (рис. 1.19).

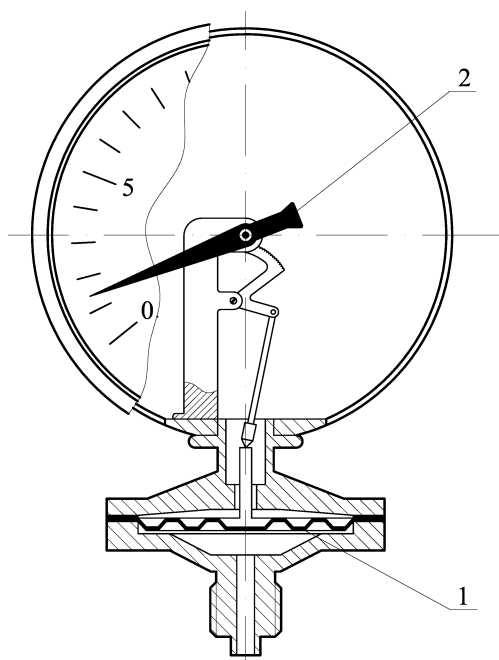


Рис. 1.19
Мембранный манометр

Верхняя часть мембраны сообщается с атмосферой, с нижней стороны на нее действует давление жидкости и вызывает деформацию пластинки. В результате стрелка поворачивается на некоторый угол и по шкале производится отсчет давления. Изменяя размеры мембраны и ее жесткость, можно создавать приборы для измерения различных диапазонов давлений.

Преимущество мембранных манометров — хорошая стабильность нулевого положения стрелки при изменениях температуры окружающей среды, возможность измерения давления агрессивных сред и вязких жидкостей, применение в условиях, когда приборы подвергаются сотрясениям, вибрации и т. д. Однако любая мембрана обладает приемлемой линейностью при относительно небольшом ходе, соизмеримым с толщиной мембраны, что ограничивает диапазон измеряемых давлений; при длительной эксплуатации происходит снижение упругих свойств материала. Кроме того, точность и чувствительность этих приборов ниже пружинных манометров.

ГРУЗОПОРШНЕВЫЕ МАНОМЕТРЫ

Грузопоршневые манометры предназначены для калибровки (поверки) средств измерений абсолютного, избыточного (положительного и отрицательного) давления и разности давлений, в том числе при рабочем статическом давлении.

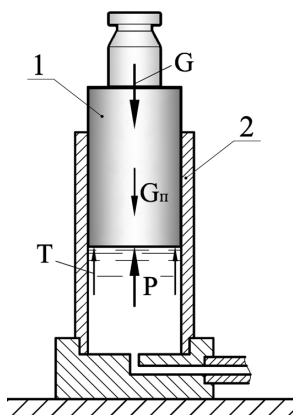


Рис. 1.20

Грузопоршневой манометр

Поршневой манометр — манометр, в котором действующее на поршень измеряемое давление преобразуется в силу и определяется по значению силы, необходимой для ее уравнивания. В наиболее распространенных поршневых манометрах давление уравнивается весом грузов, действующих на поршень определенного диаметра, поэтому их называют грузопоршневыми (рис. 1.20).

Грузопоршневой манометр состоит из цилиндрического поршня 1, притертого к цилиндру 2 с минимально возможным зазором. На нижний торец поршня, опущенного в жидкость, действует измеряемое давление p , для уравнивания которого к поршню должна быть приложена сила G .

Уравнение равновесия действующих сил имеет вид:

$$G + G_{\text{п}} = P + T.$$

где $G_{\text{п}}$ — вес поршня, Н; $P = p\omega$ — сила давления жидкости на поршень снизу, Н; p — измеряемое давление, Па; ω — площадь поперечного сечения поршня, м^2 ; T — сила трения на боковой поверхности поршня, возникающая при протекании жидкости через зазор между поршнем и цилиндром, Н.

Давление, действующее на поршень определяется по формуле:

$$p = \frac{G + G_{\text{п}} - T}{\omega_{\text{пр}}},$$

где $\omega_{\text{пр}}$ — приведенная площадь поршня, определяемая с учетом ширины радиального зазора между поршнем и цилиндром (приводится в паспорте прибора), м^2 .

Измерение давления сводится к подбору груза G , при котором вес подвижной части прибора ($G + G_{\text{п}}$) уравнивает силу измеряемого давления и силу трения T . Наиболее существенное достоинство поршневых манометров состоит в том, что они непосредственно воспроизводят давление по определению: давление равно силе, деленной на площадь поршня. Этот метод так же, как и метод уравнивания давления столбом жидкости, является фундаментальным.

Поршневые манометры играют ведущую роль при проверке и испытаниях различных приборов для измерения давления в широком диапазоне от 1 кПа до десятков тысяч МПа и широко применяются в качестве национальных государственных эталонов давления.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

Электрические приборы (рис. 1.21) функционируют по принципу зависимости одного из электрических параметров чувствительного элемента первичного преобразователя от давления. Основным элементом является упругая стальная мембрана, регистрирующим — тензометр, пьезоэлемент, потенциометр.

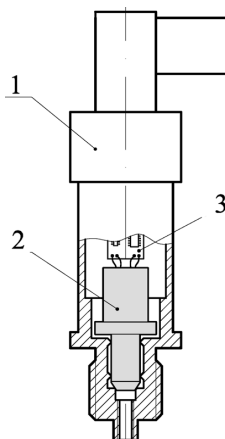


Рис. 1.21

Датчик давления:

1 — корпус; 2 — чувствительный элемент (мембрана и преобразователь);
3 — электронный блок.

У **тензометрического датчика** прогиб мембраны под действием давления вызывает удлинение тензометра и, следовательно, изменение его электрического сопротивления и силы тока в цепи, что записывается или регистрируется вторичным прибором.

В **датчиках давления с частотным выходом** в качестве возбудителя и преобразователя колебаний упругой мембраны используются пьезокерамические, пьезокристаллические элементы, пьезорезонаторы, пьезоэлектрические пластинки и другие устройства, включенные в электрическую измерительную схему для формирования и регистрации сигнала, зависящего от действующего на мембрану давления. Одним из недостатков датчиков этого типа является сложность конструкции.

В **потенциометрическом датчике** чувствительным элементом является гофрированная мембрана, соединенная с

корпусом. Шток, закрепленный в центре мембраны, передает ее деформацию на щетку, которая скользит по реохорду. Изменение сопротивления измеряют осциллографом или потенциометром. Разработаны различные модификации этого датчика для измерения перепада давления на участках трубопровода или в рабочих органах машин и аппаратов с подачей сигнала на выход электронного самопишущего потенциометра, отградуированного в единицах давления.

Сравнительный анализ различных типов приборов для измерения давления приведен в таблице 1.8.

Т а б л и ц а 1.8

**Достоинства, недостатки и область применения
различных типов приборов для измерения давления**

Наименование прибора	Достоинства	Недостатки	Область применения
Жидкостные приборы	Простота устройства, высокая точность, стабильность показаний и низкая стоимость	Громоздкость, хрупкость конструкции, малые пределы измеряемого давления (напора), колебания уровня жидкости в обоих коленях часто затрудняют отсчет показаний	Широкое применение в лабораторной практике в виде рабочих и образцовых манометров для градуировки шкал и проверок других приборов
Деформационные приборы	Достаточно высокая для технических целей точность измерения в широком диапазоне давлений (от 100 Па до 1000 МПа); приборы компактны, портативны, просты по конструкции, надежны в эксплуатации, безопасны в работе	При длительной эксплуатации происходит понижение упругих свойств материала из которого изготовлен чувствительный элемент	Для измерения избыточного давления и разряжения жидкостей, газов и паров в трубопроводах

Продолжение табл. 1.8

Наименование прибора	Достоинства	Недостатки	Область применения
Грузо-поршневые манометры	Поршневые манометры непосредственно воспроизводят давление по определению: давление равно силе, деленной на площадь поршня; наиболее стабильны по сравнению с манометрами других типов позволяют осуществить преобразование измеряемого давления в силу или в давление другого назначения; измеряемое давление практически не влияет на размеры прибора	Показания поршневых манометров зависят от условий, в которых проводятся измерения; при измерениях высокой точности необходимо вводить соответствующие поправки, учитывающие влияние условий измерений: температуры окружающей среды, деформации поршня и цилиндра под действием измеряемого давления, для поршневых манометров, в которых измеряемое давление определяется по весу уравнивающих его грузов, необходимо учитывать местное ускорение свободного падения и потерю массы грузов в воздухе	Предназначены для калибровки (поверки) средств измерений абсолютного, избыточного, вакуумметрического давления и разности давлений, в том числе при рабочем статическом давлении; диапазон измерения от 1 кПа до десятков тысяч МПа; широко применяются в качестве национальных государственных эталонов давления
Электрические приборы	Высокая чувствительность, быстрое действие, малые масса и размеры позволяют измерять давление в труднодоступных местах, где невозможно поместить манометр или откуда нецелесообразно вести трубку к нему	Сложность конструкции	Используются как манометры (для жидкости, газа и пара) и вакуумметры (для газовых сред) с дистанционной передачей показаний на расстоянии 50 м и более от места отбора давления и для измерения давления при быстропотекающих процессах; отдельные модификации применяются для измерения перепада давления на участках трубопровода или в рабочих органах машин и аппаратов

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка показана на рисунке 1.22.

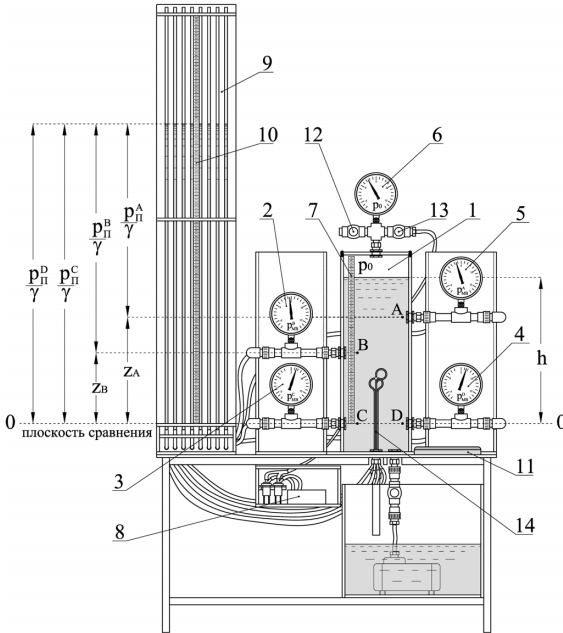


Рис. 1.22

Схема лабораторной установки

Установка состоит из герметичного бака 1, частично заполненного водой, к которому подключены пьезометры и мановакуумметры 2–6. Все пьезометры вынесены на общий пьезометрический щит 9 со шкалой 10. На свободной поверхности воды с помощью компрессора 8 можно создавать избыточное или вакуумметрическое давление, величина которого измеряется мановакуумметром 6. Уровень воды от нижних точек подключения манометров измеряется линейкой 7. Управление работой компрессора осуществляется с пульта управления 11. Свободная поверхность жидкости в баке 1 сообщается с атмосферой посредством крана 12, с компрессором — крана 13. Для демонстрации одного из свойств гидростатического давления в бак 1 вмонтированы латунные трубки 14, одни концы которых внутри бака сходятся в одну точку с разных направлений, а ко вторым подключены пьезометры, выведенные на щит 9.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ И ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

1. Ознакомиться с методами измерения давления.
2. Изучить основные приборы для измерения давления.
3. Включить питание установки на пульте 11.
4. Открыть краны 12 и 13.
5. Измерить давление на свободной поверхности жидкости мановакууметром 6.
6. Снять показания мановакуумметров 2–5 в точках А, В, С и D.
7. Измерить пьезометрический напор в точках А, В, С и D по шкале 10 на щите 9.
8. Измерить геодезическую высоту в соответствующих точках.
9. Измерить уровень жидкости в баке линейкой 7.
10. Измерить барометром атмосферное давление.
11. Закрыть кран 12 (кран 13 открыт).
12. Создать на свободной поверхности воды избыточное давление нажатием и удержанием соответствующей кнопки на пульте 11 управления компрессором. *(При создании избыточного давления необходимо следить за уровнем жидкости в пьезометрах и не допускать перелива жидкости.)*
13. Закрыть кран 13 (кран 12 закрыт).
14. Повторить пункты 5–7.
15. Открыть кран 13 (кран 12 закрыт).
16. Создать на свободной поверхности воды вакуумметрическое давление нажатием и удержанием соответствующей кнопки на пульте 11 управления компрессором. *(При создании вакуума необходимо следить за уровнем жидкости в пьезометрах и не допускать, чтобы уровень опустился ниже плоскости сравнения 0–0 (начала шкалы на пьезометрическом щите)).*
17. Закрыть кран 13 (кран 12 закрыт).
18. Повторить пункты 5–7.
19. Убедиться, что давление не зависит от ориентации площадки действия в пространстве, о чем свидетельствуют одинаковые отметки уровней воды в пьезометрах, подключенных к латунным трубкам 14.
20. Открыть кран 12 и выключить установку.
21. Произвести обработку опытных данных.
22. Результаты расчетов занести в таблицу.
23. Сделать выводы по работе.

Таблица опытных данных

Наименование показателя	Обозначение	Единица измерения	Опыт		
			1	2	3
1. Удельный вес жидкости	γ	Н/м ³			
2. Геодезическая высота в точках A , B , C и D	z_A	см			
		м			
	z_B	см			
		м			
	z_C	см			
		м			
	z_D	см			
		м			
3. Атмосферное давление	$p_{\text{атм}}$	мм рт. ст.			
		Па			
4. Давление на свободной поверхности жидкости по мановакуумметру (с учетом знака)	p_0	кПа			
		Па			
5. Давление в точках A , B , C и D по мановакуумметру (с учетом знака)	p_{MB}^A	кПа			
		Па			
	p_{MB}^B	кПа			
		Па			
	p_{MB}^C	кПа			
		Па			
	p_{MB}^D	кПа			
		Па			
6. Пьезометрический напор в точках A , B , C и D	$H_p^A = z_A + \frac{p^A}{\gamma}$	см			
		м			
	$H_p^B = z_B + \frac{p^B}{\gamma}$	см			
		м			
	$H_p^C = z_C + \frac{p^C}{\gamma}$	см			
		м			
	$H_p^D = z_D + \frac{p^D}{\gamma}$	см			
		м			
7. Пьезометрическая высота в точках A , B , C и D (с учетом знака)	$h_p^A = H_p^A - z_A$	м			
	$h_p^B = H_p^B - z_B$	м			
	$h_p^C = H_p^C - z_C$	м			
	$h_p^D = H_p^D - z_D$	м			

Продолжение табл. 1.9

Наименование показателя	Обозначение	Единица измерения	Опыт		
			1	2	3
8. Давление в точках A, B, C и D , рассчитанное по показаниям пьезометров (с учетом знака)	$p_{\pi}^A = \gamma h_p^A$	Па			
		кПа			
	$p_{\pi}^B = \gamma h_p^B$	Па			
		кПа			
	$p_{\pi}^C = \gamma h_p^C$	Па			
		кПа			
	$p_{\pi}^D = \gamma h_p^D$	Па			
		кПа			
9. Уровень жидкости в баке	h	см			
		м			
10. Глубина погружения точек A, B, C и D	$h_A = h - z_A$	м			
	$h_B = h - z_B$	м			
	$h_C = h - z_C$	м			
	$h_D = h - z_D$	м			
11. Давление в точках A, B, C и D расчетное (с учетом знака)	$p_{\text{расч}}^A = p_0 + \gamma h_A$	Па			
	$p_{\text{расч}}^B = p_0 + \gamma h_B$	Па			
	$p_{\text{расч}}^C = p_0 + \gamma h_C$	Па			
	$p_{\text{расч}}^D = p_0 + \gamma h_D$	Па			
12. Абсолютное давление в точках A, B, C и D	$p_{\text{абс}} = p_{\text{атм}} + p_{\text{расч}}^A$	Па			
		кгс/см ² (ат)			
		бар			
		м вод. ст.			
	$p_{\text{абс}} = p_{\text{атм}} + p_{\text{расч}}^B$	Па			
		кгс/см ² (ат)			
		бар			
		м вод. ст.			
	$p_{\text{абс}} = p_{\text{атм}} + p_{\text{расч}}^C$	Па			
		кгс/см ² (ат)			
		бар			
		м вод. ст.			
	$p_{\text{абс}} = p_{\text{атм}} + p_{\text{расч}}^D$	Па			
		кгс/см ² (ат)			
		бар			
		м вод. ст.			

Продолжение табл. 1.9

Наименование показателя	Обозначение	Единица измерения	Опыт		
			1	2	3
13. Относительная ошибка (характеризующая отличие давления измеренного мановакуумметром, пьезометром и расчетного в точках A, B, C, D)	δ_A	%			
	δ_B	%			
	δ_C	%			
	δ_D	%			

Контрольные вопросы

1. Что такое гидростатическое давление? В каких единицах оно измеряется? Что такое абсолютное, избыточное и вакуумметрическое давление?

2. Как записывается основное уравнение гидростатики? Есть ли различие в понятиях «гидростатический напор» и «пьезометрический напор»?

3. По какой формуле можно рассчитать давление в любой точке покоящейся жидкости? От чего зависит величина давления?

4. Какие методы измерения давления существуют? Дайте классификацию основных видов приборов для измерения давления жидкости.

5. Какой принцип измерения давления положен в основу действия жидкостных приборов? Назовите основные виды жидкостных приборов. Как с помощью этих приборов измерить давление жидкости? В чем их достоинства и недостатки?

6. Назовите основные виды деформационных приборов. В чем состоит принципиальное отличие этих приборов от жидкостных и поршневых и сходство с электрическими?

7. Каков принцип действия поршневых манометров? Где они применяются?

8. По какому принципу функционируют электрические приборы?

9. Почему при выполнении лабораторной работы во всех пьезометрах уровни воды находятся на одинаковой отметке? Как изменятся отметки уровней воды, если вместо пьезометров использовать закрытые трубки, из которых полностью удален воздух?

10. Какие свойства гидростатического давления можно продемонстрировать на лабораторной установке?

Лабораторная работа № 1.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНА ПАСКАЛЯ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучить теоретические сведения по теме лабораторной работы.
2. Провести эксперимент, наглядно демонстрирующий закон Паскаля.
3. Исследовать закон Паскаля на примере гидравлического пресса, сделать выводы.

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

Сообщающиеся сосуды. Если два герметично закрытых сообщающихся сосуда заполнить разнородными не смешивающимися жидкостями, находящимися в равновесии, то между ними установится горизонтальная плоскость раздела $n-n$, одновременно являющаяся плоскостью равного давления (рис. 1.23).

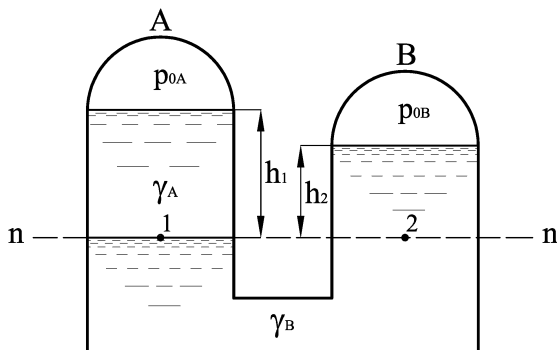


Рис. 1.23
Сообщающиеся сосуды

Обозначив через γ_A и γ_B удельные веса жидкостей, p_{0A} и p_{0B} , соответственно, давление на свободной поверхности жидкости в сосудах A и B , величины гидростатического давления в точках 1 и 2 , лежащих в горизонтальной плоскости $n-n$ будут равными:

$$p_1 = p_2,$$

т. е.

$$p_{0A} + \gamma_A \cdot h_1 = p_{0B} + \gamma_B \cdot h_2,$$

где h_1 и h_2 — заглубление точек 1 и 2 под свободные поверхности жидкостей в сосудах A и B , м.

Полученная зависимость характеризует условия равновесия жидкостей в сообщающихся сосудах и позволяет рассмотреть следующие частные случаи.

1. Если в сообщающихся сосудах находится однородная жидкость ($\gamma_A = \gamma_B = \gamma$) под одинаковым внешним давлением ($p_{0A} = p_{0B}$), то уровни жидкостей в сосудах будут расположены на одной отметке, т.е.

$$h_1 = h_2.$$

2. Если в сообщающихся сосудах находится однородная жидкость ($\gamma_A = \gamma_B = \gamma$) под различным внешним давлением ($p_{0A} \neq p_{0B}$), то высота, соответствующая разности внешних (поверхностных) давлений будет равна разности высот от свободной поверхности жидкости до поверхности равного давления:

$$\frac{p_{0A} - p_{0B}}{\gamma} = h_2 - h_1.$$

3. Если в сообщающихся сосудах находятся две несмешивающиеся жидкости ($\gamma_A \neq \gamma_B$) под одинаковым внешним давлением ($p_{0A} = p_{0B}$), то отношение высот над плоскостью раздела жидкостей обратно пропорционально отношению их удельных весов:

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{\gamma_2}{\gamma_1}.$$

Закон Паскаля, вытекающий из основного уравнения гидростатики записанного в виде $p_{abc} = p_0 + \gamma h$, можно сформулировать следующим образом: *давление, приложенное к внешней поверхности жидкости, передается всем точкам этой жидкости и по всем направлениям одинаково.*

На применении законов Паскаля и сообщающихся сосудов работают простейшие гидростатические машины (гидравлические прессы, домкраты, подъемники, аккумуляторы, мультипликаторы и др.).

Гидравлический пресс (рис. 1.24) состоит из двух сообщающихся между собой цилиндров с большим и малым поршнями. Малый поршень имеет шток, к которому через рычаг передается усилие q . При этом на шток, а следовательно, и на весь малый поршень, будет действовать сила:

$$T = q \frac{b}{a},$$

где a и b — плечи рычага, м.

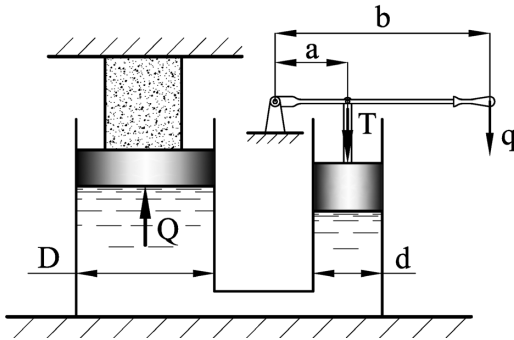


Рис. 1.24

Схема гидравлического пресса

Сила T является поверхностной, действующей на каждую точку жидкости, соприкасающейся с поверхностью малого поршня и создающей давление:

$$p = \frac{T}{\omega_1} = \frac{4T}{\pi d^2},$$

где ω_1 — площадь малого поршня, м^2 ; d — диаметр малого поршня, м.

По закону Паскаля давление p под большим поршнем равно давлению p под малым поршнем. Сила Q , возникающая при этом, определяется по выражению:

$$Q = p \cdot \omega_2 = p \frac{\pi D^2}{4},$$

где ω_2 — площадь большого поршня, м^2 ; D — диаметр большого поршня, м.

Сила Q будет во столько раз больше силы T , во сколько раз площадь большого поршня ω_2 будет больше площади малого поршня ω_1 :

$$Q = p \cdot \omega_2 = \frac{T}{\omega_1} \omega_2 = \frac{4T}{\pi d^2} \frac{\pi D^2}{4} = T \frac{D^2}{d^2}$$

или, учитывая момент силы,

$$Q = q \frac{b}{a} \frac{D^2}{d^2}.$$

В действительности сила Q будет меньше вследствие трения поршня о стенки цилиндра. Это уменьшение учитывается введением коэффициента полезного действия $\eta = 0,75 \dots 0,80$ и тогда:

$$Q = \eta \cdot q \cdot \frac{b}{a} \cdot \frac{D^2}{d^2}.$$

Гидравлические подъемники и домкраты работают по тому же принципу что и пресс, их отличие только в конструктивном исполнении.

Гидравлический мультипликатор (рис. 1.25) (гидропреобразователь) предназначенный для увеличения давления в жидкости, состоит из корпуса, содержащего две камеры и поршень.

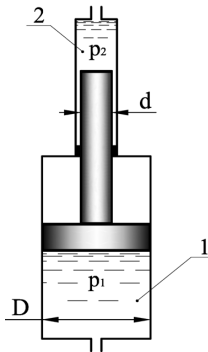


Рис. 1.25

Схема гидравлического мультипликатора

Если в камере 1 создается гидростатическое давление p_1 , то из условия равновесия гидростатическое давление p_2 в камере 2 должно удовлетворять условиям:

$$p_2 \omega_2 = p_1 \omega_1,$$

откуда

$$p_2 = p_1 \frac{\omega_1}{\omega_2} = p_1 \left(\frac{D}{d} \right)^2,$$

где ω_1 и ω_2 — нижняя и верхняя площади поршня, м^2 ; D и d — диаметры нижней и верхней частей поршня, м .

Очевидно, что при помощи гидравлического мультипликатора гидростатическое давление повышается в ω_1/ω_2 раз.

Гидравлические аккумуляторы (рис. 1.26) предназначены для накопления энергии рабочей жидкости, что необходимо при эпизодической работе гидравлических приводов. Гидроаккумулятор обеспечивает работу насоса с постоянной нагрузкой и защиту гидросистем от возможных гидроударов, являясь регулятором статического давления в гидросети, а также компенсатором изменения объема при изменении температуры.

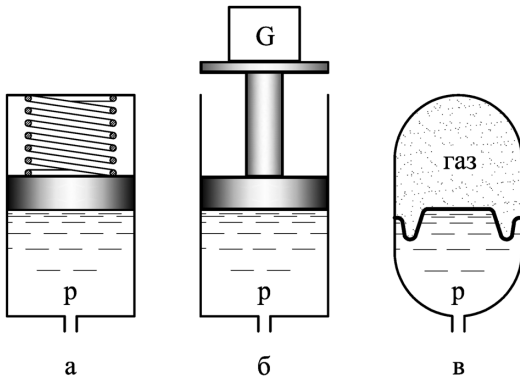


Рис. 1.26

Гидравлические аккумуляторы:

а — пружинные; б — грузовые; в — пневматические.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Установка (рис. 1.27) состоит из корпуса 1, бака с рабочей жидкостью 2, клапанов — всасывающего 3 и нагнетательного 4, малого поршня 5 со штоком 6, рычага 7, прессирующих упоров 9, большого поршня 10, манометра 11 для замера повышения давления при прессовании и вентилля 12 для слива рабочей жидкости в бак и сброса показаний манометра.

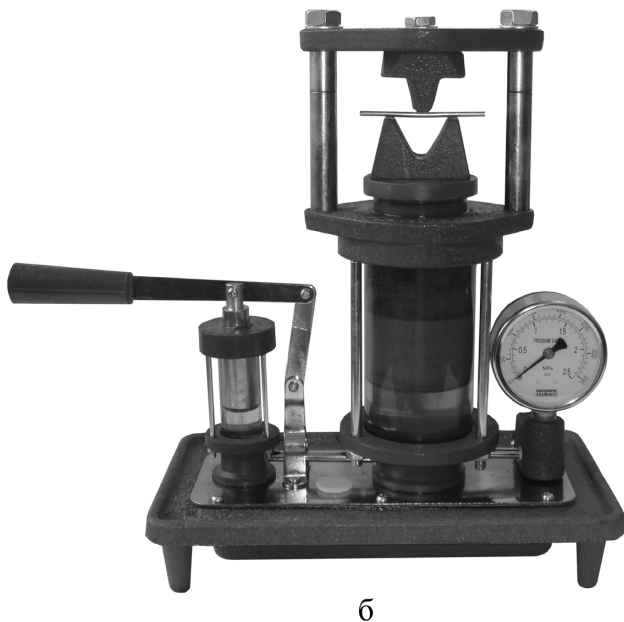
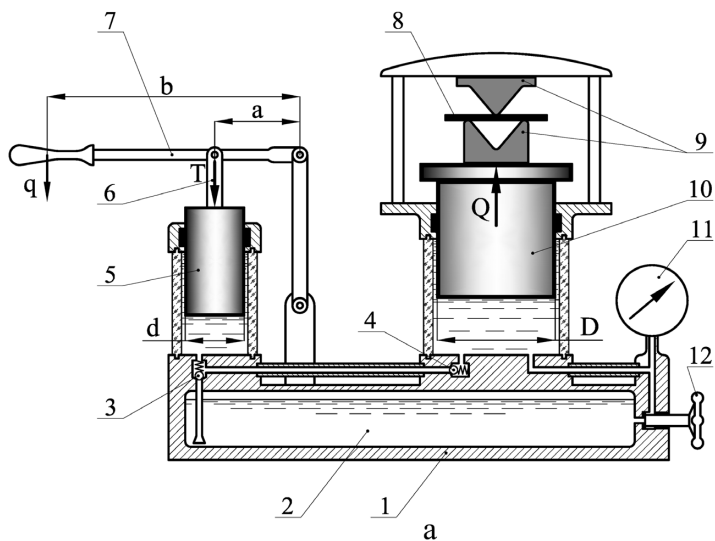


Рис. 1.27

Лабораторная установка:

а — схема лабораторной установки; б — фото лабораторной установки.

Лабораторная установка работает следующим образом. Под действием усилия q на рычаг 7 малый поршень 5 перемещается вниз, при этом избыточное давление, образующееся в цилиндре под малым поршнем, закрывает всасывающий клапан 3 (рис. 1.27), и открывает нагнетательный клапан 4. Рабочая жидкость (масло) под избыточным давлением нагнетается в полость цилиндра под большой поршень и одновременно к манометру 11. В момент, когда малый поршень 5 перемещается вверх под действием разряжения, открывается всасывающий клапан 3, закрывается нагнетательный клапан 4 и рабочая жидкость, поступающая из бака 2, заполняет пространство в цилиндре под малым поршнем.

Перемещение большого поршня вниз осуществляется открытием вентиля 12, при этом рабочая жидкость из цилиндра большого поршня сливается в бак 2 и одновременно обнуляется манометр 11.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ И ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

Наглядная демонстрация закона Паскаля

1. Изучить устройство и принцип действия лабораторной установки (Лабораторная работа № 1.2 «Гидростатическое давление. Методы и средства для измерения давления»).

2. Включить питание установки на пульте 11.

3. Закрыть кран 12 (кран 13 открыт).

4. Убедиться, что пьезометрический напор в точках А, В, С и D одинаков — показания всех пьезометров на пьезометрическом щите 9 должны находиться на одном уровне.

5. Создать на свободной поверхности жидкости избыточное давление, для чего нажать и удерживать на пульте 11 соответствующую кнопку управления компрессором.

При создании избыточного давления необходимо следить за уровнем жидкости в пьезометрах и не допускать перелива жидкости.

6. Убедиться, что пьезометрический напор в точках А, В, С и D изменился на одинаковую величину — показания всех пьезометров на пьезометрическом щите 9 должны находиться на одном уровне.

7. Создать на свободной поверхности жидкости вакуум, для чего нажать и удерживать на пульте 11 соответствующую кнопку управления компрессором.

При создании вакуума необходимо следить за уровнем жидкости в пьезометрах и не допускать, чтобы уровень опустился ниже плоскости сравнения 0–0 (начала шкалы на пьезометрическом щите).

8. Убедиться, что пьезометрический напор в точках А, В, С и D изменился на одинаковую величину — показания всех пьезометров на пьезометрическом щите 9 должны находиться на одном уровне.

9. Открыть кран 12 и выключить установку.

10. Сделать выводы по работе.

Исследование закона Паскаля на примере гидравлического пресса

1. Изучить теоретические основы, устройство и принцип действия гидравлического пресса.

2. Проверить закрытие сливного вентиля 12.

3. Установить заготовку 8 между прессующими упорами 9.

4. При помощи рычага 7 повышать давление в гидравлической системе пресса до момента деформации заготовки 8.

5. Снять показания манометра 11.

6. Произвести обработку опытных данных.

7. Результаты расчетов занести в таблицу.

8. Сделать выводы по работе.

Т а б л и ц а 1.10

Таблица опытных данных

Наименование показателя	Обозначение	Единица измерения	Значения показателей
1. Диаметр малого поршня	d	см	
		м	
2. Диаметр большого поршня	D	см	
		м	
3. Длины плеч рычага	a	см	
		м	
	b	см	
		м	
4. Площадь малого поршня	$\omega_1 = \frac{\pi d^2}{4}$	м ²	
5. Площадь большого поршня	$\omega_2 = \frac{\pi D^2}{4}$	м ²	

Продолжение табл. 1.10

Наименование показателя	Обозначение	Единица измерения	Значения показателей
6. Показания манометра	p	МПа	
		Па	
7. Сила, приложенная к штоку рычага	$T = p \cdot \omega_1$	Н	
8. Усилие, приложенное к рычагу	$q = T \frac{a}{b}$	Н	
9. Прессующая сила	$Q = p \cdot \omega_2$	Н	

Контрольные вопросы

1. Объяснить, что такое сообщающиеся сосуды.
2. Записать условие равновесия жидкости в сообщающихся сосудах. Как выглядят его частные случаи?
3. Сформулировать закон Паскаля.
4. Привести примеры в каких гидравлических машинах используется закон Паскаля и сообщающихся сосудов.
5. Объяснить назначение и принцип действия гидравлического пресса.
6. Записать формулу зависимости между силами, приложенными к поршням гидравлического пресса, и площадями этих поршней.
7. Как работает гидравлический мультипликатор?
8. Какие контрольно-измерительные приборы работают на применении закона Паскаля?
9. Объяснить назначение и принцип действия гидравлических аккумуляторов.
10. Объяснить, как работает гидроаккумулятор.

Лабораторная работа № 1.4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛЫ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ПЛОСКУЮ СТЕНКУ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучить основные теоретические сведения по теме лабораторной работы.
2. Определить силу гидростатического давления на плоскую стенку, центр давления. Построить эпюру давления, сделать выводы по работе.

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

Сила гидростатического давления жидкости, действующая на плоскую поверхность (рис. 1.28), определяется произведением давления в центре тяжести смоченной поверхности на ее площадь и направлена по нормали к ней.

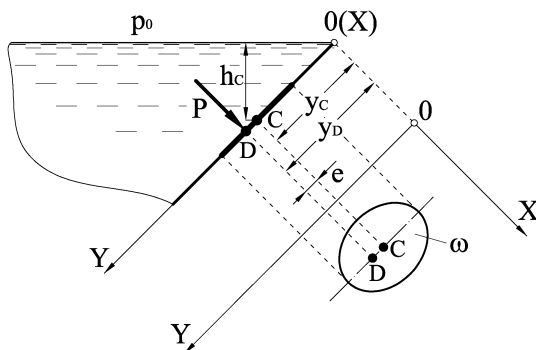


Рис. 1.28

Схема к определению силы гидростатического давления
на плоские стенки

$$P = p_C \cdot \omega = (p_0 + \gamma \cdot h_C) \cdot \omega,$$

где p_C — гидростатическое давление в центре тяжести смоченной поверхности фигуры, Па; ω — площадь смоченной поверхности, м^2 ; h_C — глубина погружения центра тяжести, м.

Если на поверхности жидкости давление атмосферное, то определяется сила избыточного гидростатического давления:

$$P_{\text{изб}} = \gamma \cdot h_C \cdot \omega.$$

Для симметричных плоских фигур, наиболее часто встречающихся в практике, достаточно определения положения центра давления на оси симметрии. Координата центра избыточного давления определяется по формуле:

$$y_D = y_C + e = y_C + \frac{I_0}{\omega \cdot y_C},$$

где y_C — расстояние от линии уреза жидкости до центра тяжести смоченной поверхности по оси OY , м; e — эксцентриситет (расстояние между центром тяжести C и центром давления D по оси симметрии), м; I_0 — момент инерции плоской фигуры относительно горизонтальной оси, проходящей через ее центр тяжести, м^4 .

В случае, когда плоская смоченная поверхность представляет собой прямоугольную стенку с горизонтальным основанием, силу давления жидкости можно определить графоаналитическим методом (рис. 1.29):

$$P = \Omega_{\text{эд}} \cdot b,$$

где $\Omega_{\text{эд}}$ — площадь эпюры давления, м^2 ; b — ширина прямоугольной стенки, м.

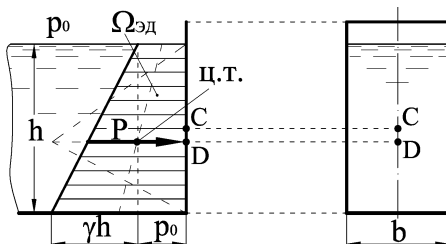


Рис. 1.29
Графоаналитический метод определения
силы давления

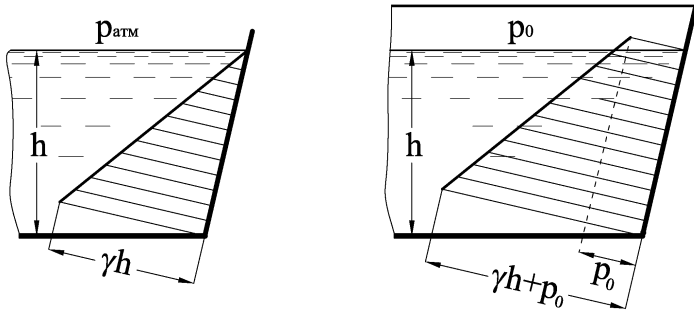


Рис. 1.30
 Эпюры избыточного давления
 на плоские прямоугольные стенки

Линия действия силы P проходит через центр тяжести эпюры давления, а вектор силы направлен перпендикулярно стенке.

Эпюра гидростатического давления — графическое изображение распределения гидростатического давления на стенку по глубине погружения.

Примеры построения эпюр избыточного гидростатического давления представлены на рисунке 1.30.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка (рис. 1.31) состоит из герметичного бака 1, частично заполненного жидкостью, к которому в разных точках, расположенных ниже уровня жидкости, присоединены приборы для измерения давления (пьезометры и мановакуумметры 2–5). Все пьезометры вынесены на общий пьезометрический щит 9, снабженный шкалой 10.

На свободной поверхности жидкости в баке 1 имеется возможность с помощью компрессора 8 создавать избыточное давление и вакуум, величина которых измеряется мановакуумметром 6. Уровень жидкости в баке 1 контролируется линейкой 7.

Управление компрессором осуществляется с пульта управления стендом 11 нажатием соответствующих кнопок. Свободная поверхность жидкости в баке 1 сообщается с атмосферой посредством крана 12, с компрессором — крана 13.



Схема лабораторной установки

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ И ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

1. Измерить ширину стенки бака b .
2. Определить вертикальное расстояние от плоскости сравнения до точки присоединения мановакуумметра (2, 3 или 5) h_1 или h_2 (в зависимости от задания преподавателя).
3. Обеспечить на свободной поверхности жидкости в баке наличие атмосферного давления $p_0 = p_{\text{атм}}$, открыв кран 12.
4. Определить уровень воды в баке h_0 (рис. 1.31).
5. Вычислить площадь смоченной поверхности стенки ω .
6. Снять показания мановакуумметра $p_{\text{мв}}$ 2, 4 или 5 (в зависимости от задания преподавателя).
7. Создать на свободной поверхности жидкости в баке избыточное давление $p_0 = p_{\text{изб}}$.
8. Повторить пункты 4–6.
9. Создать на свободной поверхности жидкости в баке вакуум $p_0 = p_{\text{вак}}$.
10. Повторить пункты 4–6.
11. Определить глубину погружения центра тяжести h_C смоченной поверхности стенки.
12. Определить гидростатическое давление в центре тяжести стенки $p_C = p_0 + \gamma h_C$.
13. Определить силу гидростатического давления на плоскую стенку $P = p_C \cdot \omega$.
14. Найти координату центра давления $h_D = h_C + \frac{I_0}{\omega \cdot h_C}$.
15. Построить эпюры гидростатического давления жидкости на плоскую стенку бака для всех трех случаев.
16. Сделать выводы по работе.

Т а б л и ц а 1.11

Таблица опытных данных

Наименование показателя	Обозначение	Единица измерения	Значения показателей в опытах		
			Атмосферное давление	Избыточное давление	Вакуум
1. Уровень воды в баке	h_0	см			
2. Ширина стенки	b	см			

Продолжение табл. 1.11

Наименование показателя	Обозначение	Единица измерения	Значения показателей в опытах		
			Атмосферное давление	Избыточное давление	Вакуум
3. Площадь стенки	$\omega = bh_0$	см ²			
		м ²			
4. Высота установки мановакуумметра	$h_1 (h_2)$	см			
5. Давление на свободную поверхность	p_0	кПа			
6. Показания мановакуумметра 1, 2 или 3	$p_{\text{мв}}$	кПа			
7. Глубина погружения центра тяжести смоченной поверхности стенки	h_c	см			
8. Давление в центре тяжести стенки	$p_c = p_0 + \gamma h_c$	кПа			
9. Сила гидростатического давления на плоскую стенку	$P = p_c \omega$	кН			
10. Глубина погружения центра давления под уровень свободной поверхности	$h_D = h_c + \frac{I_0}{\omega \cdot h_c}$	см			

Контрольные вопросы

1. Как определяется сила гидростатического давления на плоские произвольно ориентированные поверхности любой формы? Как она направлена?
2. Что такое центр давления?
3. Как определить положение центра давления?
4. Что такое эпюра давления?
5. Как строится эпюра полного давления на плоские прямоугольные стенки?
6. Как строится эпюра избыточного давления на плоские прямоугольные стенки?
7. Каким образом с помощью эпюры давления определяется величина и направление силы давления жидкости на плоские прямоугольные стенки?
8. Как влияет изменение давления на величину силы гидростатического давления на плоскую стенку?
9. Почему центр давления расположен ниже центра тяжести смоченной поверхности?
10. В каком случае центр тяжести смоченной поверхности стенки совпадает с центром давления?

Лабораторная работа № 1.5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛЫ АРХИМЕДА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучить теоретические сведения по теме лабораторной работы.

2. Определить величину архимедовой силы расчетным и опытным путем. Сравнить полученные данные, сделать выводы по работе.

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

Закон Архимеда: на тело, погруженное в жидкость, действует выталкивающая (архимедова) сила, направленная вертикально вверх и равная весу жидкости, вытесненной этим телом (рис. 1.32):

$$P_A = \gamma_{\text{ж}} W,$$

где $\gamma_{\text{ж}}$ — удельный вес жидкости, Н/м³; W — объем тела, погруженного в жидкость (объемное водоизмещение), м³.

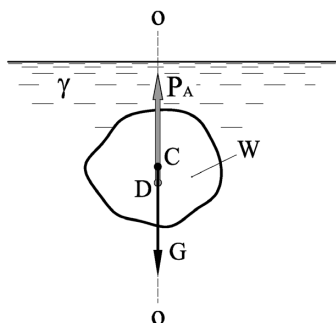


Рис. 1.32
К определению архимедовой силы

Вес жидкости в объеме погруженного тела называется **водоизмещением**, а точка приложения выталкивающей силы P_A — **центром водоизмещения D** .

Возможны три случая соотношения веса погруженного в жидкость тела G и архимедовой силы P_A :

1. $G > P_A$ — тело тонет;
2. $G < P_A$ — тело всплывает до тех пор, пока архимедова сила, уменьшаясь, не станет равной весу тела;
3. $G = P_A$ — тело плавает в полностью или частично погруженном состоянии.

Практический интерес представляет случай плавания тела в безразличном равновесии $G = P_A$ и определение условий его остойчивости.

Плавающим называют способность тела плавать в частично погруженном состоянии.

Остойчивостью называют способность плавающего тела, выведенного из состояния равновесия, вновь возвращаться в первоначальное положение.

В положении равновесия центр тяжести плавающего тела C и центр водоизмещения D лежат на одной вертикальной прямой $O-O$, являющейся осью симметрии тела и называемой **осью плавания**.

Остойчивость плавающего тела зависит от расположения на оси плавания центров тяжести и водоизмещения. При плавании в полностью погруженном состоянии тело будет остойчивым (рис. 1.33), если его центр тяжести C будет расположен на оси плавания ниже центра водоизмещения D , так как пара сил — вес тела G и архимедова сила P_A — стремятся вернуть тело в положение равновесия.

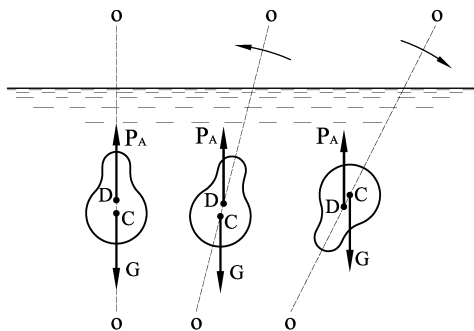


Рис. 1.33

Плавание тела в полностью погруженном состоянии

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка (рис. 1.34) состоит из штатива 1, динамометра пружинного 2, сосуда отливного 3, грузов 4 с удельным весом, превышающим удельный вес воды, стакана градуированного 5.

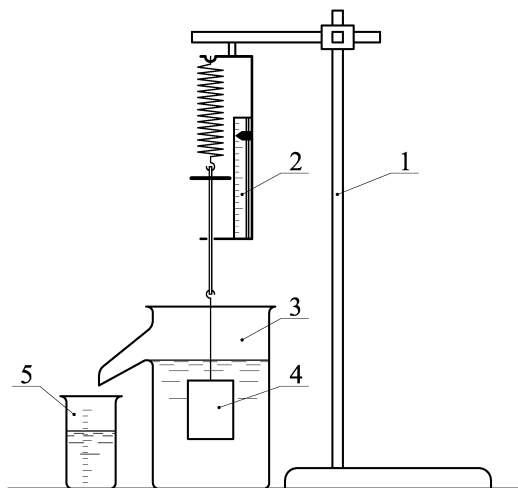


Рис. 1.34

Схема лабораторной установки

Установка действует следующим образом. К динамометру, закрепленному в штативе, подвешивается груз, при этом пружина растягивается и ее указатель определяет вес груза в воздухе. Отливной стакан наполняют жидкостью до уровня отливной трубки. Приподняв груз, подвешенный к пружине динамометра, под него подставляют отливной стакан. Плавное опускание груза, его целиком погружают в жидкость. При погружении часть жидкости выльется из отливного сосуда в градуированный стакан, пружина сожмется, подняв вверх указатель, который покажет вес груза в жидкости.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ И ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

1. Закрепить в штативе динамометр.
2. Подвесить на динамометре груз и определить его вес G_1 в воздухе.

3. Измерить плотность жидкости, которой будет заполняться отливной стакан, с помощью ареометра.

4. Отливной стакан наполнить жидкостью до уровня отливной трубки.

5. Приподнять груз и подставить под него отливной стакан.

6. Плавно отпуская груз, полностью погрузить его в жидкость, при этом часть жидкости из отливного стакана перельется в градуированный стакан.

7. Определить вес груза в жидкости G_2 и объем жидкости в градуированном стакане W .

8. Повторить опыт с другим грузом.

9. Произвести обработку опытных данных.

10. Результаты расчетов занести в таблицу.

11. Сделать выводы по работе.

Т а б л и ц а 1.12

Таблица опытных данных

Наименование показателя	Обозначение	Единица измерения	Опыт	
			1	2
1. Плотность жидкости	ρ	кг/м ³		
2. Удельный вес жидкости	$\gamma = \rho g$	Н/м ³		
3. Вес груза в воздухе	G_1	Н		
4. Вес груза в жидкости	G_2	Н		
5. Объем жидкости в градуированном стакане	W	см ³		
		м ³		
6. Сила Архимеда, определенная по динамометру	$P_{\text{Адин}} = G_1 - G_2$	Н		
7. Сила Архимеда, определенная по формуле	$P_A = \gamma \cdot W$	Н		
8. Относительная ошибка	δ	%		

Контрольные вопросы

1. Какие силы действуют на погруженное в жидкость тело?
2. Сформулируйте закон Архимеда.
3. Как определяется архимедова сила?
4. Дайте определение плавучести и остойчивости тела.
5. Какие существуют случаи плавания тела? Поясните их.
6. Что такое ось плавания?
7. Каковы условия плавания тел?
8. Запишите условие остойчивости тела при плавании в полностью погруженном состоянии и дайте соответствующие пояснения.
9. Как определяется выталкивающая сила опытным путем?
10. Отличается ли вес тела, взвешенного в воздухе и в воде? Если да, то на сколько?

Лабораторная работа № 1.6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОРМЫ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЖИДКОСТИ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ СОСУДЕ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучить теоретические сведения по теме лабораторной работы.
2. Определить опытным путем форму свободной поверхности жидкости в цилиндрическом сосуде, вращающемся относительно вертикальной оси с постоянной угловой скоростью, сделать выводы по работе.

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

Относительный покой жидкости — равновесие жидкости относительно стенок сосуда, движущегося вместе с жидкостью относительно Земли. В это состояние жидкость приходит через некоторое время после начала движения, когда исчезает перемещение частиц жидкости друг относительно друга при движении сосуда. Жидкость будет двигаться как твердое тело, участвуя только в переносном движении.

В таком состоянии жидкость в сосуде может находиться при движении прямолинейно с некоторым постоянным ускорением или вращении с постоянной угловой скоростью.

На жидкость, находящуюся в состоянии относительно покоя, из массовых сил помимо силы тяжести действует сила инерции или центробежная сила. В зависимости от характера действующих массовых сил поверхности равного давления, как и свободная поверхность, могут принимать различную форму.

Жидкое тело сохраняет при относительном покое свою форму и, следовательно, силы трения отсутствуют.

Основным дифференциальным уравнением, описывающим состояние относительного покоя жидкости, в общем случае является уравнение равновесия Эйлера, которое выражает приращение давления dp при изменении координат dx, dy, dz

$$dp = \rho \cdot (Xdx + Ydy + Zdz),$$

где dp — давление в точках жидкости; ρ — плотность жидкости; X, Y, Z — проекции ускорения массовых сил на соответствующие оси; x, y, z — координаты точек жидкости в системе отсчета, относительно которой жидкость покоится.

Обычно при рассмотрении относительного покоя жидкости решаются две задачи:

- устанавливается закон распределения давления в жидкости в соответствии с уравнением Эйлера;
- определяется форма поверхности равного или постоянного давления, в том числе и свободной поверхности жидкости, при условии, что $p = \text{const}$, $dp = 0$. Уравнение Эйлера примет следующий вид:

$$Xdx + Ydy + Zdz = 0.$$

Это уравнение носит название уравнения поверхности равного или постоянного давления, которое показывает, что элементарная работа, которую совершают массовые силы по перемещению жидкости вдоль поверхности равного давления, равна нулю. Такое возможно только лишь в том случае, если результирующее ускорение массовых сил перпендикулярно соответствующему элементу поверхности равного давления или, наоборот, элемент поверхности равного давления перпендикулярен результирующей ускорения массовых сил (закон Гюйгенса).

Относительный покой жидкости в цилиндрическом сосуде, вращающемся вокруг вертикальной оси с постоянной угловой скоростью ω . В данном случае массовые силы, действующие на жидкость, — сила тяжести и центробежная сила, ускорения которых равны g и $\omega^2 r$ соответственно. Результирующее ускорение увеличивается с увеличением радиуса вращения за счет второй составляющей, а угол наклона ее к горизонту уменьшается.

В сосуде, равномерно вращающемся вокруг вертикальной оси, поверхности равного давления представляют собой параболоиды вращения, ось которых совпадает с осью вращения сосуда (рис. 1.35).

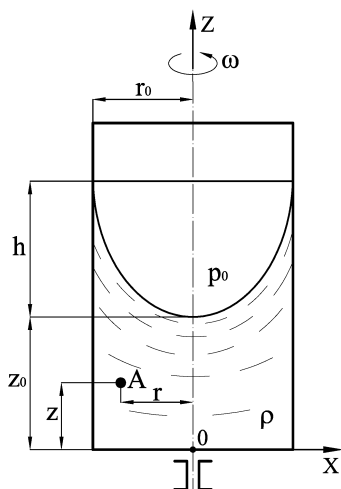


Рис. 1.35
*Относительный покой жидкости
 во вращающемся сосуде
 относительно вертикальной оси*

Распределение давления жидкости по глубине определяется выражением

$$p = p_0 + \gamma \left((z_0 - z) + \frac{\omega^2 \cdot r^2}{2g} \right), \quad (1.2)$$

где z_0 — вертикальная координата вершины параболоида поверхности равного давления, м; r, z — координаты любой точки поверхности равного давления, м; p_0 — давление в точке с координатами $r = 0, z = z_0$, Па.

Уравнение (1.2) показывает, что давление возрастает пропорционально r^2 и уменьшается пропорционально высоте z .

Для любой точки свободной поверхности при $p = p_0$, уравнение (1.2) примет следующий вид

$$z = \frac{\omega^2 \cdot r^2}{2g} + z_0. \quad (1.3)$$

Уравнение (1.3) дает возможность определить угловую скорость ω или частоту вращения сосуда по измеренным значениям z и r или наоборот, по известной частоте вращения (угловой скорости) определить форму и размер жидкостной воронки.

Высота параболоида вращения

$$h = \frac{\omega^2 r_0^2}{2g}, \quad (1.4)$$

где r_0 — радиус цилиндрического сосуда.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка (рис. 1.36) состоит из прозрачного цилиндра 1, установленного в обойму 2. С помощью передаточного устройства 3 осевой валик 4 обоймы соединен с электродвигателем, приводящим систему во вращение с постоянной угловой скоростью. Над цилиндром установлена рама 10 с измерительным устройством 7, состоящим из измерительной иглы 5 и каретки 6. При вращении рукоятки 12, каретка вместе с иглой перемещается в горизонтальной плоскости, отсчет перемещения фиксируется по шкале 11. Вертикально измерительная игла перемещается при вращении рукоятки 9. Вертикальную координату свободной поверхности жидкости измеряют по шкале 8.

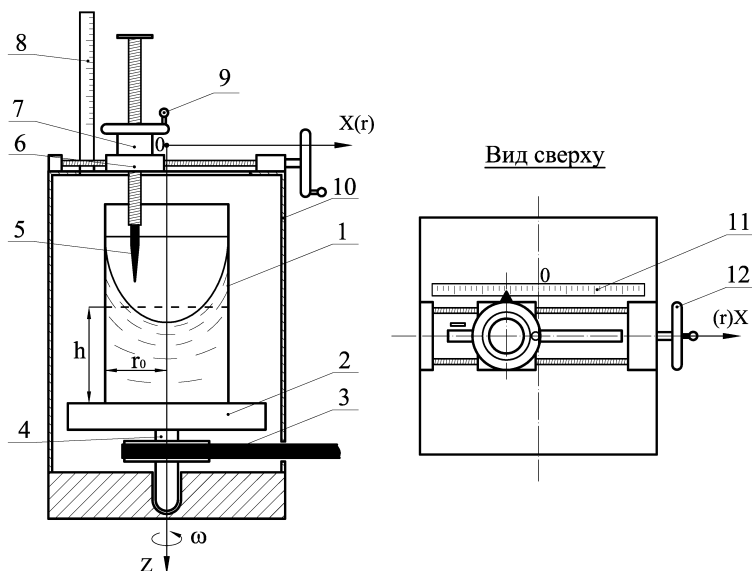


Рис. 1.36

Схема лабораторной установки

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ И ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

1. Ознакомиться с описанием лабораторной установки.
2. Налить в цилиндрический сосуд жидкость примерно до половины его высоты.
3. Закрыть цилиндр рамой, установить каретку 6 на нулевую отметку шкалы 11.
4. Измерить глубину жидкости в сосуде h и определить ее объем W .
5. Привести сосуд с жидкостью во вращение с постоянной угловой скоростью ω .
6. Опустить измерительную иглу вниз до ее соприкосновения со свободной поверхностью жидкости. По шкале 11 определить координату r , по шкале 8 — координату z' точки свободной поверхности жидкости.
7. Поднять измерительную иглу и переместить ее в горизонтальном направлении вправо или влево на 1 см. Повторить измерения (п. 6).
8. Снять аналогичным образом показания для 7–8 точек.
9. Обработать опытные данные.
10. Занести результаты расчетов в таблицу 1.13.
11. Построить на основе опытных данных кривую свободной поверхности жидкости (рис. 1.37). Сравнить ее с теоретической формой свободной поверхности, полученной по формуле (1.3).
12. Сделать выводы по работе.

Т а б л и ц а 1.13

Таблица опытных данных

Наименование показателя	Обозначение	Единица измерения	Опыты							
			1	2	3	4	5	6	7	8
1. Глубина воды в сосуде	h	см								
2. Радиус дна сосуда	r_0	см								
3. Высота сосуда	H	см								
4. Координата вершины параболы	$z_0 = H - z'_0$	см								
5. Объем жидкости в сосуде	$W_0 = \pi \cdot r_0^2 \cdot h$	см ³								
6. Частота вращения	n	мин ⁻¹								

Продолжение табл. 1.13

Наименование показателя	Обозначение	Единица измерения	Опыты							
			1	2	3	4	5	6	7	8
7. Угловая скорость	$\omega = \frac{\pi n}{30}$	с^{-1}								
8. Координаты точки свободной поверхности	r	см								
	z'	см								
	$z = H - z'$									
9. Высота параболоида	h_{Π}	см								
10. Объем параболоида	$W_{\Pi} = \frac{\pi \cdot r_0^2 \cdot h_{\Pi}}{2}$	см^3								
11. Координаты точки свободной поверхности (теоретические)	r	см								
	$z_r = \frac{\omega^2 \cdot r^2}{2g}$	см								

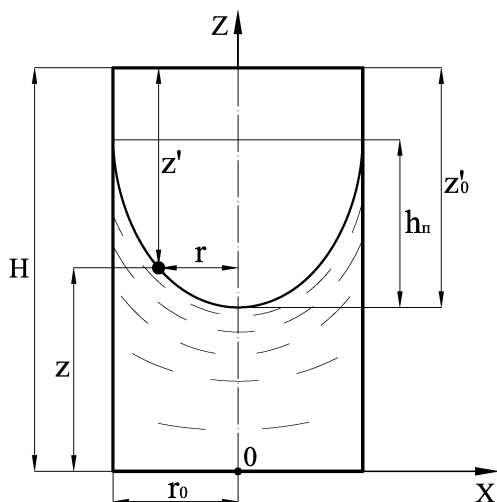


Рис. 1.37

Построение кривой свободной поверхности

Контрольные вопросы

1. Что называют относительным равновесием жидкости?
2. Каким уравнением описывается состояние относительно-го покоя жидкости?

3. Каким уравнением определяется форма поверхности равного или постоянного давления, что это уравнение показывает?
4. Какие массовые силы действуют на жидкость при относительном равновесии?
5. Чему равны ускорения массовых сил, действующих на жидкость при относительном равновесии?
6. Что происходит с равнодействующей ускорения массовых сил с увеличением радиуса вращения?
7. Как определить гидростатическое давление в любой точке жидкости, находящейся в сосуде, вращающемся с постоянной угловой скоростью вокруг вертикальной оси?
8. Какую форму имеет свободная поверхность жидкости при вращении сосуда вокруг вертикальной оси?
9. Как определяется высота параболоида вращения?
10. Каким уравнением описывается распределение давления по глубине?

**ПРИМЕРЫ
ТЕСТОВЫХ ЗАДАНИЙ
ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ**

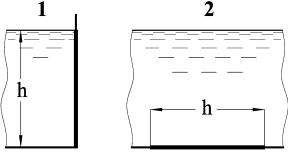
**«ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТИ
И ГИДРОСТАТИКА»**

КАРТОЧКА РУБЕЖНОГО КОНТРОЛЯ

ВАРИАНТ № 1

№ п/п	Вопросы	Ответы
1	Что такое плотность однородной жидкости?	1. Отношение веса жидкости к ее объему. 2. Свойство жидкости изменять объем при изменении температуры и давления. 3. Отношение массы жидкости к ее объему. 4. Свойство жидкости оказывать сопротивление относительному сдвигу ее слоев. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
2	Сосуд с жидкостью движется с постоянным ускорением a параллельно горизонтальной оси Y. Ось Z направлена вертикально вверх Чему равны значения $\frac{dP}{dX}$, $\frac{dP}{dY}$, $\frac{dP}{dZ}$?	1. $\frac{dP}{dX} = 0$; $\frac{dP}{dY} = \rho a$; $\frac{dP}{dZ} = \rho g$. 2. $\frac{dP}{dX} = \frac{dP}{dZ} = 0$; $\frac{dP}{dY} = \rho a$. 3. $\frac{dP}{dX} = 0$; $\frac{dP}{dY} = -\rho a$; $\frac{dP}{dZ} = -\rho g$. 4. $\frac{dP}{dX} = \frac{dP}{dY} = \frac{dP}{dZ} = 0$ 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
3	На какой высоте от плоскости сравнения находится свободная поверхность жидкости в открытом резервуаре с жидкостью $\gamma = 7,2 \text{ кН/м}^3$, если избыточное давление в точке, расположенной выше плоскости сравнения на 7 м, составляет 36 кПа?	1. 12 м. 2. 10,5 м. 3. 15 м. 4. 1,5 м. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.

Продолжение табл.

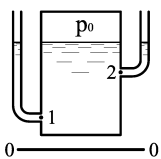
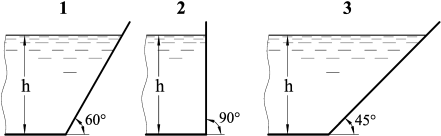
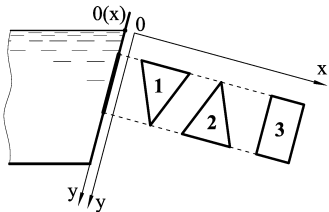
№ п/п	Вопросы	Ответы
4	Как изменится уровень в пьезометре, подсоединенном к сосуду с жидкостью с удельным весом $8,0 \text{ кН/м}^3$, если удлинить его, запаять сверху и откачать полностью воздух?	1. Увеличится на 1,2 м. 2. Увеличится на 1,23 м. 3. Увеличится на 12,3 м. 4. Уменьшится на 12 м. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
5	Чему равен гидростатический напор, если избыточное давление на свободной поверхности в неподвижном геометрически закрытом сосуде равно 180 кПа ? Плоскость сравнения расположена ниже свободной поверхности на 14 м, удельный вес жидкости $9,0 \text{ кН/м}^3$	1. 24,0 м. 2. 34,0 м. 3. 14 м. 4. 16 м. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
6	Как изменится величина силы давления воды на вертикальную прямоугольную стенку шириной b и высотой h , если она будет расположена горизонтально?	 1. Не изменится. 2. Увеличится в 2 раза. 3. Уменьшится в 2 раза. 4. Уменьшится в 4 раза. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
7	Дизельное топливо $\rho = 860 \text{ кг/м}^3$ хранится в цилиндрической емкости высотой 4 м, диаметром 1 м. Чему равна сила избыточного давления топлива на дно хранилища?	1. 30,0 кН. 2. 26,5 кН. 3. 57,5 кН. 4. 12,5 кН. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.

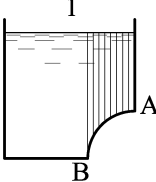
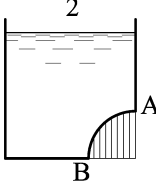
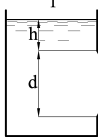
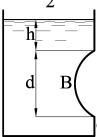
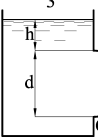
Продолжение табл.

№ п/п	Вопросы	Ответы
8	На каком рисунке правильно показано тело давления? Как направлена вертикальная составляющая?	1. Рисунок 2, вверх. 2. Рисунок 3, вверх. 3. Рисунок 1, вниз. 4. Рисунок 3, вниз. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
9	Горизонтальная составляющая силы избыточного давления жидкости плотностью ρ на криволинейную цилиндрическую поверхность определяется по формуле:	1. $P_x = \rho b(h + r)r/2$. 2. $P_x = \rho b(h - r/2)r$. 3. $P_x = \gamma b(h + r/2)r$. 4. $P_x = \gamma b(h + r)r/2g$. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
10	Тело весом $G = 5$ кН плавает в воде в полностью погруженном состоянии. Чему равна выталкивающая сила?	1. 10 кН. 2. 5 кН. 3. 20 кН. 4. 15 кН. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.

ВАРИАНТ № 2

№ п/п	Вопросы	Ответы
1	Сжимаемость жидкости — это	1. Отношение веса жидкости к ее объему. 2. Свойство жидкости изменять объем под действием давления. 3. Отношение массы жидкости к ее объему. 4. Свойство жидкости оказывать сопротивление относительному сдвигу ее слоев. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
2	На какую величину отличается давление в двух бесконечно близких точках, лежащих в горизонтальной плоскости XOY ?	1. $dp = \rho(Xdx + Ydy + Zdz)$. 2. $dp = \rho(Ydy + Zdz)$. 3. $dp = \rho(Xdx + Ydy)$. 4. $dp = \rho(Xdx + Zdz)$. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
3	Чему равно вакуумметрическое давление, если абсолютное давление равно: а) 30 кПа; б) 7,5 м вод. ст.	1. а) 68,1 кПа; б) 2,5 м вод. ст. 2. а) 128,1 кПа; б) 4,0 м вод. ст. 3. а) 36,1 кПа; б) 1,5 м вод. ст. 4. а) 12,81 кПа; б) 40,0 м вод. ст. 5. Верных ответов. Дайте свой правильный ответ.
4	Предельная величина вакуума в единицах давления равна $p_{\text{вак}}^{\text{пред}} = 98,1$ кПа. Какова предельная вакуумметрическая высота $h_{\text{вак}}^{\text{пред}}$ для жидкости с удельным весом $\gamma = 7,85$ кН/м ³ ?	1. 0,00125 м. 2. 1,25 м. 3. 12,5 м. 4. 0,0125 м. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.

№ п/п	Вопросы	Ответы
5	В неподвижном герметически закрытом сосуде с жидкостью показаны две точки 1 и 2 и горизонтальная плоскость 0–0. В какой из этих двух точек гидростатический напор больше?	 1. В точке 1. 2. В точке 2. 3. Одинаковы. 4. Гидростатические напоры в этих точках сравнивать нельзя. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
6	На рисунке показаны прямоугольные стенки, поддерживающие перед собой одинаковую глубину жидкости и имеющие одинаковую ширину. Укажите номера этих стенок в порядке уменьшения силы гидростатического давления	 1. №№ 3, 1, 2. 2. №№ 2, 3, 1. 3. №№ 1, 3, 2. 4. №№ 1, 2, 3. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
7	На рисунке показаны в развертке на плоскость чертежа две треугольные фигуры и одна прямоугольная одинаковой площади. Укажите номера этих фигур в порядке возрастания силы гидростатического давления со стороны жидкости	 1. №№ 1, 2, 3. 2. №№ 1, 3, 2. 3. №№ 2, 3, 1. 4. Все силы одинаковы. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.

№ п/п	Вопросы	Ответы
8	С помощью построения тела давления определяется вертикальная составляющая силы давления жидкости на криволинейную поверхность. На каком из рисунков правильно показано штриховкой тело давления для поверхности АВ? Как направлена вертикальная составляющая силы?	  - На рисунке 1, вверх. - На рисунке 1, вниз. - На обоих рисунках тело давления показано неверно. - На рисунке 2, вниз. - Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
9	На рисунке показаны три цилиндрические криволинейные стенки ABC, имеющие одинаковый поперечный размер. Перечислите эти стенки в порядке возрастания горизонтальной составляющей силы гидростатического давления (жидкость одна и та же)	   №№ 1, 2, 3. №№ 3, 2, 1. №№ 2, 3, 1. №№ 3, 1, 2. - Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
10	На рисунке показаны одинаковые сосуды с жидкостью, вращающиеся вокруг вертикальной оси с постоянной угловой скоростью. На каком из рисунков правильно показана свободная поверхность жидкости в сосуде?	    5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.

ВАРИАНТ № 3

№ п/п	Вопросы	Ответы
1	Температурное расширение жидкости — это	1. Отношение веса жидкости к ее объему. 2. Свойство жидкости изменять объем в процессе ее изобарического нагрева. 3. Отношение массы жидкости к ее объему. 4. Свойство жидкости оказывать сопротивление относительному сдвигу ее слоев. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
2	Как записывается основное уравнение гидростатики?	1. $z_1 + p_1/\rho = z_2 + p_2/\rho$. 2. $z_1 + p_1/\gamma_1 = z_2 + p_2/\gamma_2$. 3. $z_1 + p_1/\gamma = z_2 + p_2/\gamma$. 4. $z_1 + p_1/2g = z_2 + p_2/2g$. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
3	Укажите значение абсолютного давления: а) в точке с вакуумметрическим давлением 52,8 кПа; б) в точке с избыточным давлением 67,4 кПа	1. а) 45,3 кПа; б) 165,5 кПа. 2. а) 61,3 кПа; б) 146,5 кПа. 3. а) 98,1 кПа; б) 127,3 кПа. 4. Абсолютное давление в обеих точках одинаково. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
4	Вычислить пьезометрическую высоту, соответствующую давлению 98,1 кПа для: 1) воды; 2) масла с удельным весом 8,0 кН/м ³	1. 1 и 1,2 м. 2. 10 и 12,25 м. 3. 0,1 и 0,12 м. 4. Пьезометрическая высота в обоих случаях одинакова. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.

№ п/п	Вопросы	Ответы
5	Жидкость с удельным весом $8,5 \text{ кН/м}^3$ находится в состоянии абсолютного равновесия. Гидростатический напор относительно плоскости сравнения равен 18 м вод. ст. Чему равняется давление в точке, расположенной на 12 м выше плоскости сравнения?	1. 51 кПа. 2. 45 кПа. 3. 80 кПа. 4. $5,1 \text{ кПа}$. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
6	Сосуды с одинаковой площадью основания наполнены водой на высоту h. Перечислите номера сосудов в порядке убывания силы давления воды на дно	1. Силы давления одинаковы. 2. 2, 1, 3. 3. 1, 2, 3. 4. 3, 2, 1. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
7	Чему равна сила избыточного давления жидкости ($\gamma = 7,85 \text{ кН/м}^3$) на вертикальную крышку, перекрывающую круглое отверстие диаметром $d = 1 \text{ м}$, если уровень жидкости расположен выше центра отверстия на $2,5 \text{ м}$?	1. $18,5 \text{ кН}$. 2. $10,7 \text{ кН}$. 3. $25,3 \text{ кН}$. 4. $2,53 \text{ кН}$. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.

Продолжение табл.

№ п/п	Вопросы	Ответы
8	Плоские стенки одинаковой площади погружены в воду. Укажите номера стенок в порядке возрастания силы давления	1. 2, 1, 3. 2. 1, 2, 3. 3. 3, 2, 1. 4. 2, 3, 1. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
9	Сила давления жидкости на криволинейную цилиндрическую поверхность определяется по формуле:	1. $P = \Omega_{\text{э.д.}} b$. 2. $P = \sqrt{P_x^2 + P_z^2}$. 3. $P = \sqrt{P_x + P_z}$. 4. $P = \gamma W_{\text{т.д.}}$. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
10	Тело плавает частично погруженным в жидкость. Для обеспечения остойчивости необходимо, чтобы метацентрическая высота h_m:	1. $h_m < 0$. 2. $h_m = 0$. 3. $h_m > 0$. 4. $h_m = r_m$. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.

Часть 2
ГИДРОДИНАМИКА

Лабораторная работа № 2.1

ИССЛЕДОВАНИЕ УРАВНЕНИЯ БЕРНУЛЛИ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучить теоретические сведения по теме лабораторной работы.

2. Провести на напорном трубопроводе переменного сечения наблюдения за изменениями полной удельной энергии осевой струйки, переходами удельной потенциальной энергии потока в кинетическую и обратно в соответствии с уравнением Бернулли.

3. Определить с помощью трубки Пито скорость осевой струйки. Сравнить измеренный скоростной напор осевой струйки с вычисленным по средней скорости.

4. Построить напорную и пьезометрическую линии для потока жидкости, провести анализ, сделать выводы по работе.

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

Уравнение Бернулли устанавливает зависимость между скоростью и давлением в различных сечениях одной и той же струйки жидкости.

При установившемся плавно изменяющемся движении уравнение Бернулли для элементарной струйки идеальной (невязкой) жидкости имеет вид:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{u_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{u_2^2}{2g} = \text{const.}$$

Каждый член этого уравнения имеет линейную размерность:

z — геометрическая высота положения центра тяжести сечения относительно горизонтальной плоскости сравнения $O-O$, м;

$\frac{p}{\gamma}$ — пьезометрическая высота, соответствующая давлению p , м;

$\frac{u^2}{2g}$ — скоростной напор, м, где u — скорость движе-

ния струйки в данном сечении (рис. 2.1а).

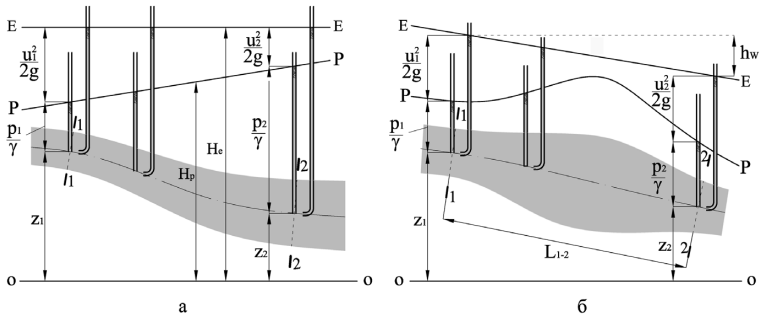


Рис. 2.1

Графическое представление уравнения Бернулли для элементарной струйки:

а — для идеальной жидкости; б — для реальной жидкости.

Линия, проходящая по горизонтам жидкости в пьезометрах, установленных вдоль оси струйки, называется *пьезометрической линией* $P-P$. Линия $P-P$ возвышается на величину $\frac{p}{\gamma}$ над осью струйки и на $z + \frac{p}{\gamma}$ — над плоскостью сравнения $O-O$. Величина $H_p = z + \frac{p}{\gamma}$ называется *пьезометрическим напором*. Сумма трех слагаемых

$$z + \frac{p}{\gamma} + \frac{u^2}{2g} = H_e$$

называется *полным (гидродинамическим) напором* в данном сечении струйки. Линия, проведенная от плоскости сравнения $O-O$ на расстоянии полных напоров H_e в каждом сечении струйки, называется *напорной линией* ($E-E$).

Таким образом, уравнение Бернулли можно сформулировать так: для элементарной струйки идеальной жидкости полный напор есть величина постоянная ($H_e = \text{const}$) во всех сечениях струйки и графически изображается горизонтальной прямой (рис. 2.1а).

Уравнение Бернулли можно интерпретировать не только с геометрической точки зрения, но и с энергетической или физической — уравнение представляет собой частный случай (для жидкого тела) общего закона сохранения энер-

гии. Полная энергия струйки складывается из потенциальной и кинетической энергий. Энергия, отнесенная к единице веса жидкости, называется *удельной энергией*.

Каждый член уравнения Бернулли характеризует тот или иной вид удельной энергии:

z — удельная потенциальная энергия положения;

$\frac{p}{\gamma}$ — удельная потенциальная энергия давления;

$\frac{u^2}{2g}$ — удельная кинетическая энергия.

Удельная потенциальная и удельная кинетическая энергии в разных сечениях по длине струйки могут изменяться, но их сумма при движении идеальной жидкости остается постоянной.

Реальная жидкость обладает вязкостью, в связи с чем часть энергии струйки будет расходоваться на преодоление сопротивлений движению, обусловленных силами внутреннего трения. Поэтому для струйки реальной жидкости полный напор H_{e1} в сечении 1-1 (рис. 2.1б) будет всегда больше, чем полный напор H_{e2} в сечении 2-2 на величину этих потерь:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{u_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{u_2^2}{2g} + h_{w(1-2)},$$

где $h_{w(1-2)}$ — потери энергии или потери напора между выбранными сечениями.

Поскольку полный напор вдоль струйки уменьшается, его значения по длине струйки изображаются не горизонтальной прямой, как в случае для идеальной жидкости, а некоторой кривой, отметки которой понижаются по направлению движения (в частном случае струйки постоянного сечения — наклонной прямой) (рис. 2.1б).

Рассматривая поток жидкости как совокупность множества элементарных струек, уравнение Бернулли для потока реальной жидкости при установившемся плавно изменяющемся движении приобретает вид:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{w(1-2)}, \quad (2.1)$$

где v — средняя скорость в соответствующем живом сечении; α — коэффициент Кориолиса, учитывающий неравно-

мерность распределения скоростей в живом сечении потока.

Коэффициент Кориолиса α представляет собой отношение действительной кинетической энергии жидкости, протекающей через живое сечение потока в единицу времени, к кинетической энергии, которая имела бы место при том же расходе, если бы все частицы жидкости имели одинаковую среднюю скорость v . Значение коэффициента α зависит от степени неравномерности распределения скоростей в живом сечении потока (рис. 2.2) и всегда $\alpha \geq 1$. При плавно изменяющемся движении, которое в основном рассматривается в гидравлике, коэффициент Кориолиса принимается равным 1,05...1,1.

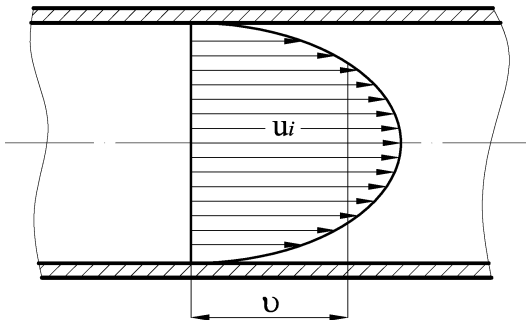


Рис. 2.2

Эпюра распределение скоростей в потоке жидкости

Геометрическая интерпретация уравнения Бернулли для потока реальной жидкости представлена рисунке 2.3. Уравнение (2.1) для потока жидкости также является математическим выражением закона сохранения энергии.

Уравнение Бернулли широко применяется в различных разделах гидравлики для решения многих теоретических и практических задач. Однако следует помнить, что оно справедливо для условий установившегося плавно изменяющегося движения. Условие плавной изменяемости должны соблюдаться в сечениях, для которых записывается уравнение Бернулли. Между сечениями движение жидкости может быть и не плавно изменяющимся.

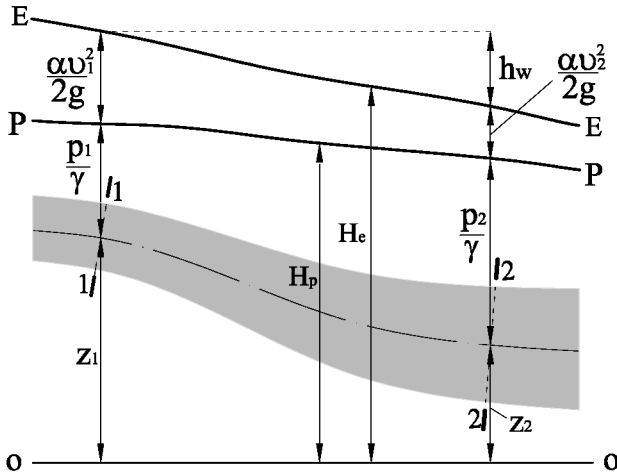


Рис. 2.3

Геометрическая интерпретация уравнения Бернулли для потока реальной жидкости

Для некоторых частных случаев уравнение Бернулли имеет следующий вид:

- напорное движение жидкости в трубе с горизонтальной осью:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{w(1-2)};$$

- напорное движение жидкости в горизонтальной цилиндрической трубе:

$$\frac{p_1}{\gamma} = \frac{p_2}{\gamma} + h_{w(1-2)};$$

- напорное движение жидкости в наклонной цилиндрической трубе:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + h_{w(1-2)}.$$

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка (рис. 2.4, 2.5) состоит из напорного резервуара 1 и присоединенного к нему наклонного трубопровода 2 переменного сечения, в конце которого установлен вентиль 3 для регулирования расхода воды.

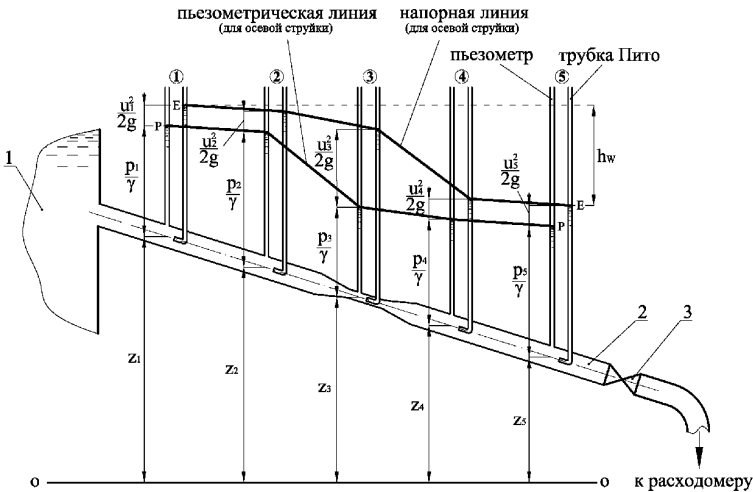


Рис. 2.4
Схема лабораторной установки

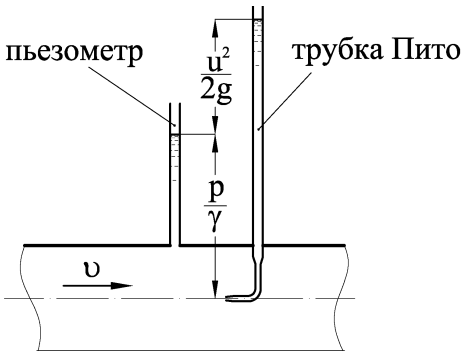


Рис. 2.5
Пьезометр и трубка Пито

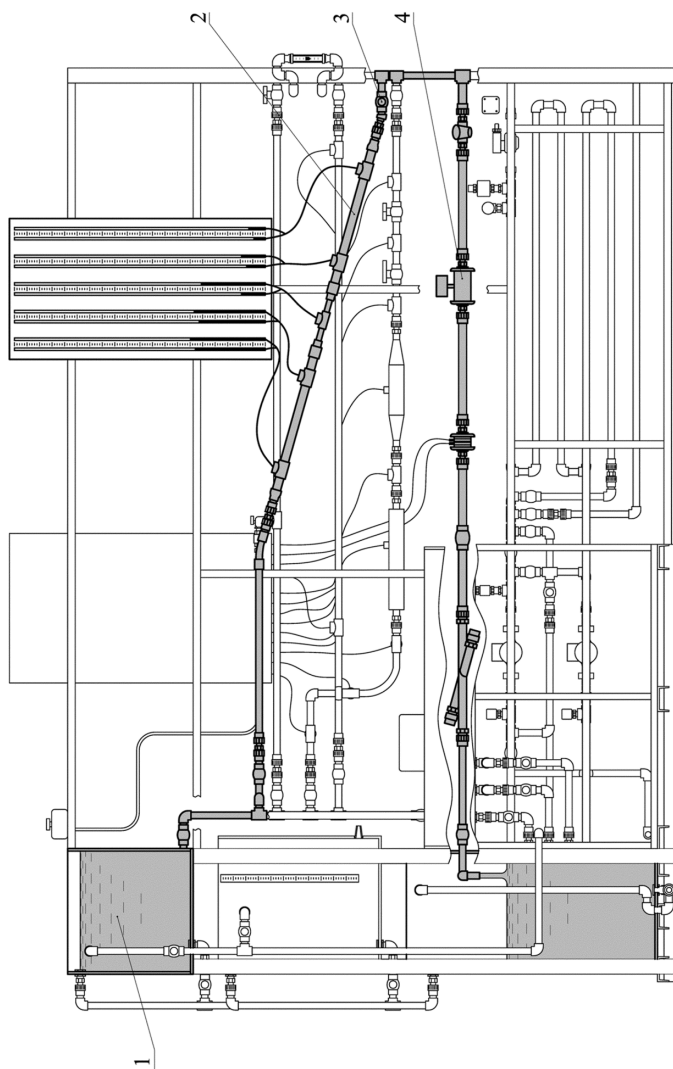


Рис. 2.6
Стенд для проведения лабораторной работы

Вдоль трубопровода в пяти характерных сечениях установлены пьезометры и трубки Пито (трубки полного напора). Показания этих приборов отсчитывают по шкале, ноль которой совпадает с горизонтальной плоскостью, принимаемой за плоскость сравнения $O-O$. Для измерения расхода воды на сливном трубопроводе установлен электромагнитный расходомер 4.

Пьезометры применяются для измерения давления в месте их подключения (рис. 2.4). При выбранной шкале отсчета учитывается высота центра тяжести сечения над плоскостью сравнения $O-O$, и, соответственно, уровень воды в пьезометре фактически соответствует величине пьезометрического напора (удельной потенциальной энергии)

$$H_p = z + \frac{P}{\gamma} \text{ в данном сечении.}$$

Трубки Пито (рис. 2.5) применяются для измерения местной скорости u в любой точке движущейся жидкости. Этот прибор представляет собой трубку, нижний конец которой изогнут под углом 90° и имеет наконечник меньшего диаметра, чем диаметр трубки. Трубка устанавливается отверстием наконечника против течения жидкости в той точке, где измеряется скорость. На лабораторном стенде трубки Пито установлены в центрах тяжести сечений, т. е. на оси трубопровода, и измеряют полный напор осевой струйки.

При скорости $u = 0$ уровень жидкости в трубке Пито будет на той же отметке, что и в пьезометре. В движущейся жидкости ($u > 0$) уровень в трубке Пито поднимется выше уровня жидкости в пьезометре на высоту $h_u = \frac{u^2}{2g}$, и,

следовательно, $u = \sqrt{2 \cdot g \cdot h_u}$.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1. Наполнить резервуар водой. Конструкция напорного резервуара позволяет поддерживать уровень жидкости постоянным, чтобы обеспечить постоянство напора над центром тяжести входного сечения трубопровода, и, следовательно, установившееся движение воды в трубопроводе.

2. Убедиться в отсутствии воздуха в соединительных трубках пьезометров и трубок Пито в каждом сечении, открыть вентиль 3.

3. Записать в таблицу опытных данных показания пьезометров, трубок Пито и величину расхода по электромагнитному расходомеру 4.

4. Проанализировать характер изменения отметок уровней воды в трубках Пито, убедиться в наличии потерь напора; дать оценку влияния размера сечения на величину скоростного напора осевой струйки; убедиться во взаимной зависимости давления и скорости движения жидкости.

5. Провести обработку опытных данных.

ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

1. По разности показаний трубок Пито и пьезометров определить скоростной напор $h_u = H - H_p = \frac{u^2}{2g}$ и рассчитать скорость $u = \sqrt{2 \cdot g \cdot h_u}$ осевой струйки потока в каждом сечении.

2. Определить значение средней скорости $v = \frac{Q}{\omega}$ в сечениях и сравнить ее со скоростью u струйки.

3. Рассчитать скоростной напор (удельную кинетическую энергию) потока $h_v = \frac{\alpha \cdot v^2}{2g}$ в каждом сечении и сравнить его со скоростным напором $h_u = \frac{u^2}{2g}$ осевой струйки.

4. Определить полный напор $H_e = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{\alpha v^2}{2g} = H_p + \frac{\alpha v^2}{2g}$ в сечениях.

5. Построить напорную линию $E-E$, откладывая в масштабе значения H_e в каждом сечении от горизонтальной плоскости сравнения $O-O$.

6. Построить пьезометрическую линию $P-P$ в том же масштабе, откладывая значение пьезометрического напора $H_p = z + \frac{p}{\gamma}$ в каждом сечении (рис. 2.7).

7. Определить потери напора между первым и последующими сечениями как разность полных напоров в сечениях:

$$h_w = H_{e1} - H_{ek},$$

где H_{e1} — напор в сечении 1-1; H_{ek} — полный напор в сечении $k-k$.

8. Сделать выводы по работе.



Рис. 2.7

График полного и потенциального напоров

Т а б л и ц а 2.1

Таблица опытных данных

Наименование показателя	Обозначение	Единица измерения	Значения показателей по сечениям				
			1	2	3	4	5
1. Диаметр трубы	d	см					
2. Площадь сечения	$\omega = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$	см ²					
3. Расход воды	Q	м ³ /ч					
		см ³ /с					
4. Показания пьезометров	$H_p = z + \frac{p}{\gamma}$	см					
5. Показания трубок Пито	$H = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{u^2}{2g}$	см					
6. Скоростной напор осевой струйки	$h_u = H - H_p = \frac{u^2}{2g}$	см					

Продолжение табл. 2.1

Наименование показателя	Обозначение	Единица измерения	Значения показателей по сечениям				
			1	2	3	4	5
7. Скорость течения осевой струйки	$u = \sqrt{2 \cdot g \cdot h_u}$	см/с					
8. Средняя скорость в сечении	$v = \frac{Q}{\omega}$	см/с					
9. Скоростной напор в сечении потока при $\alpha = 1,1$	$h_v = \frac{\alpha \cdot v^2}{2g}$	см					
10. Полный напор в сечении потока	$H_e = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{\alpha \cdot v^2}{2g}$	см					
11. Потери напора от первого сечения до рассматриваемого	$h_w = H_{e1} - H_{ek}$	см					

Контрольные вопросы

1. Как записывается уравнение Бернулли для элементарной струйки и для потока реальной (вязкой) жидкости при установившемся плавно изменяющемся движении? Чем они отличаются?

2. Как записывается уравнение Бернулли для элементарной струйки идеальной жидкости?

3. Как записывается уравнение Бернулли для напорного движения жидкости в горизонтальной цилиндрической трубе?

4. Как показывается на графике напорная линия (линия полной удельной энергии) для идеальной жидкости?

5. Почему измеренные в лабораторной работе скорости u осевой струйки в различных сечениях больше средних скоростей v в тех же сечениях?

6. Как определить давление в любом сечении трубопровода по построенной в масштабе пьезометрической линии $P-P$?

7. Как определить среднюю скорость v в любом сечении потока по построенным в масштабе напорной и пьезометрической линиям?

8. При каких условиях линия полной удельной энергии (напорная линия) $E-E$ и пьезометрическая линия $P-P$ параллельны? Имеются ли такие условия на лабораторном стенде?

9. В чем заключается геометрический смысл уравнения Бернулли?

10. В чем заключается физический смысл уравнения Бернулли?

Лабораторная работа № 2.2

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА РЕЙНОЛЬДСА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучить теоретические сведения по теме лабораторной работы.
2. Провести опыты на установке Рейнольдса, позволяющие наблюдать ламинарный и турбулентный режимы движения, а также переход одного режима в другой.
3. Определить число Рейнольдса Re для каждого режима движения, сравнить его с критическим значением числа $Re_{кр}$, сделать выводы по работе.

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

При движении вязкой жидкости существуют два режима движения: ламинарный и турбулентный.

Ламинарный (*lamina* — слой) — режим, при котором частицы жидкости движутся по траекториям, параллельным стенкам трубы без перемешивания и обмена частицами между струйками. Движение в ламинарном режиме точно соответствует представлению о потоке как совокупности элементарных струек. Взаимодействие между собою отдельных струек и слоев проявляется в виде внутреннего трения по поверхности соприкосновения между ними.

Турбулентный (*turbulentus* — беспорядочный) — режим, характеризующийся беспорядочным, хаотическим движением частиц, сопровождающийся перемешиванием жидкости по всему сечению потока при общем направленном движении. Объясняется это возникновением вихревых дви-

жений, налагаемых на основной поток, что приводит к возникновению дополнительных сопротивлений движению потока.

Для определения режима движения необходимо найти число Рейнольдса Re и сравнить его с критическим значением $Re_{кр}$.

Число Рейнольдса Re — безразмерный параметр, зависящий от скорости, характерного линейного размера живого сечения и вязкости жидкости.

Для напорной трубы круглого сечения число Рейнольдса

$$Re = \frac{vd}{\nu},$$

где v — средняя скорость движения жидкости в живом сечении, м/с; d — внутренний диаметр трубы, м; ν — кинематическая вязкость, м²/с.

Для потоков произвольного поперечного сечения

$$Re = \frac{vD_{\Gamma}}{\nu} = \frac{v \cdot 4R}{\nu},$$

где $R = \frac{\omega}{\chi}$ — гидравлический радиус; χ — смоченный периметр; $D_{\Gamma} = 4R$ — гидравлический диаметр.

Изменение скорости движения жидкости (увеличение или уменьшение) приводит к смене режимов движения. Скорость потока, при которой происходит смена режима, называется *критической*. Различают *верхнюю* $v_{в.кр}$ и *нижнюю критические скорости* $v_{н.кр}$. Переход ламинарного режима в турбулентный происходит при *верхней критической скорости* $v_{в.кр}$, которая зависит от внешних условий: температуры, вибрации и т. д. Из турбулентного режима в ламинарный — при *нижней критической скорости* $v_{н.кр}$, которая при изменении внешних условий остается практически неизменной.

Границы существования того или иного режима движения жидкости определяются критическими значениями Re : *нижним* и *верхним*, значения которых соответствуют значениям критических скоростей. При $Re < Re_{кр.н}$ возможен только ламинарный режим, при $Re > Re_{кр.в}$ — только турбулентный. При $Re_{кр.н} < Re < Re_{кр.в} = 2000...4000$ наблюдается неустойчивое состояние потока.

Многочисленные исследования показали, что $Re_{кр}$ не является постоянной величиной. В практических расчетах принято считать, что при $Re < 2320$ всегда имеет место ламинарный режим, при $Re > 2320$ — всегда турбулентный режим. Движение жидкости в неустойчивой зоне исключается из рассмотрения; это приводит к некоторому запасу прочности в гидравлических расчетах в случае, если в этой зоне действительно имеет место ламинарный режим. На практике в большинстве случаев приходится иметь дело с турбулентным режимом.

Режим, при котором происходит движение жидкости, оказывает существенное влияние на потери напора.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Экспериментальная установка (рис. 2.8, 2.9) состоит из напорного бака 1, горизонтальной стеклянной трубы 5 с вентилем 4 на конце, позволяющим изменять расход воды, протекающей по трубе. Над напорным баком установлен небольшой бачок 9 с чернилами, которые по тонкой трубке 8 с иглой 6 на конце подаются в поток воды. Подача чернил регулируется краном 7. Расход воды в трубе измеряется ротаметром 3. Температура воды измеряется термометром 2.

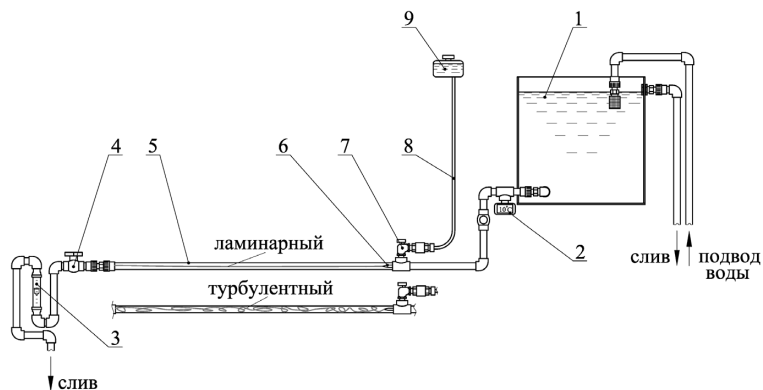


Рис. 2.8

Схема лабораторной установки

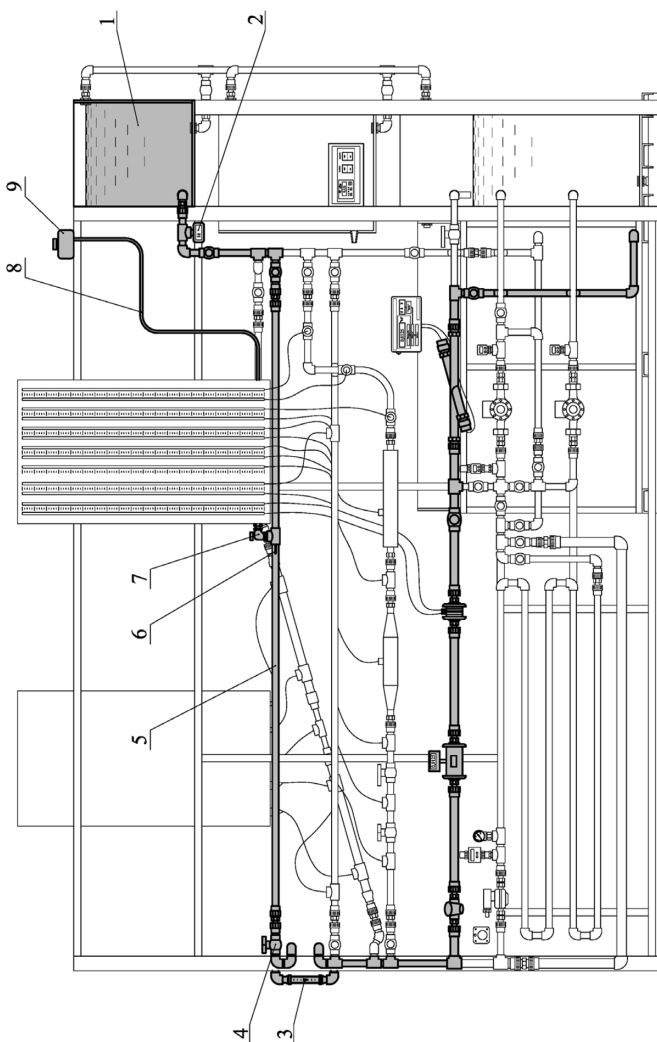


Рис. 2.9
Стенд для проведения лабораторной работы

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1. Наполнить водой напорный бак 1.
2. Открыть (минимально) вентиль 4 на конце трубы 5 (рис. 2.8).
3. Открыть кран 7 и ввести тонкую струйку чернил в поток воды в стеклянной трубе. При малых скоростях воды в трубе вводимые в поток чернила не будут перемешиваться с ней, что указывает на наличие ламинарного режима.
4. Измерить по ротаметру 3 расход воды.
5. Измерить температуру воды с помощью термометра 2.
6. Увеличить расход воды в трубе 5 открытием вентиля 4 до появления устойчивого турбулентного режима движения, характеризующегося интенсивным перемешиванием чернил с водой.
7. Повторить пункты 4–5.
8. Произвести обработку опытных данных.

ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

1. Определить площадь сечения трубы по формуле

$$\omega = \frac{\pi d^2}{4}.$$

2. Рассчитать среднюю скорость воды в трубе по формуле

$$v = \frac{Q}{\omega}.$$

3. Определить кинематический коэффициент вязкости по графику зависимости $v = f(t, ^\circ\text{C})$ (рис. 2.10).
4. Вычислить значение числа Рейнольдса по формуле

$$\text{Re} = \frac{v \cdot d}{\nu}.$$

5. Сделать выводы по работе.

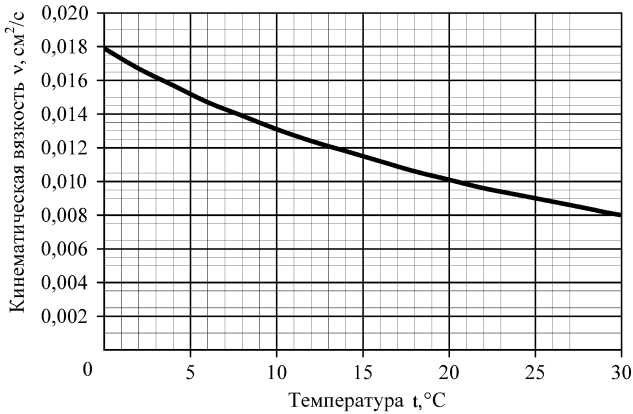
**Рис. 2.10**

График зависимости кинематической вязкости воды от температуры

Таблица 2.2**Таблица опытных данных**

Наименование показателя	Обозначение	Единица измерения	Опыт	
			1	2
1. Диаметр трубы	d	см		
2. Площадь живого сечения трубы	$\omega = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$	см ²		
3. Расход воды (по ротаметру)	Q	л/ч		
		см ³ /с		
4. Средняя скорость течения воды	$v = \frac{Q}{\omega}$	см/с		
5. Температура воды	t	°C		
6. Кинематическая вязкость (по графику)	$\nu = f(t^\circ)$	см ² /с		
7. Число Рейнольдса	Re	—		
8. Режим движения	—	—		

Контрольные вопросы

1. Дать характеристику ламинарного и турбулентного режимов движения жидкости.
2. Какова структура числа Рейнольдса? Что такое критическое число Рейнольдса?
3. От чего зависит режим движения жидкости?

4. Как изменится число Рейнольдса, если при постоянном диаметре трубы увеличивать расход жидкости?
5. Как изменится число Рейнольдса, если при постоянном диаметре трубы заменить воду на более вязкую жидкость?
6. Как изменится число Рейнольдса, если при неизменном расходе и постоянном диаметре трубы увеличивать температуру жидкости?
7. Какие формы записи числа Рейнольдса применяются?
8. Что такое верхняя и нижняя критические скорости?
9. Какие действия необходимо произвести на лабораторном стенде для обеспечения перехода турбулентного режима в ламинарный и наоборот?
10. Для чего при выполнении гидравлических расчетов необходимо определять режим движения жидкости?

Лабораторная работа № 2.3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ТРЕНИЯ ПО ДЛИНЕ ТРУБЫ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучить теоретические сведения по теме лабораторной работы.

2. Определить опытным путем значения коэффициента гидравлического трения λ по длине трубы при различных числах Рейнольдса.

3. Сравнить опытные значения λ с расчетными, соответствующими условиям проведения опытов, сделать выводы по работе.

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

Твердые поверхности, внутри которых протекает поток, оказывают на него тормозящее влияние. С механической точки зрения действие указанных поверхностей на поток эквивалентно действию напряжений, создающих сопротивление движению потока, называемое сопротивлением трения. Потеря механической энергии потока на преодоление указанных сопротивлений называется *потерей энергии на трение по длине* или *потерей напора по длине*.

Энергия, затраченная на преодоление сопротивлений по длине между двумя сечениями, может быть определена как разность полных удельных энергий в этих сечениях, т. е.

$$\begin{aligned} h_L = E_1 - E_2 &= \left(z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} \right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} \right) = \\ &= (z_1 - z_2) + \frac{p_1 - p_2}{\gamma} + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g}. \end{aligned}$$

Для расчета потерь по длине при движении жидкости в напорном трубопроводе круглого сечения обычно используют формулу Дарси — Вейсбаха:

$$h_L = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2g},$$

где λ — коэффициент гидравлического трения по длине (коэффициент Дарси); L — длина трубы, м; d — диаметр трубы, м; v — средняя скорость потока, м/с.

Для напорного трубопровода сечением, отличным от круглого, формула Дарси — Вейсбаха имеет вид

$$h_L = \lambda \cdot \frac{L}{4R} \cdot \frac{v^2}{2g},$$

где R — гидравлический радиус, м, определяемый по формуле

$$R = \frac{\omega}{\chi},$$

где ω — площадь живого сечения, м²; χ — смоченный периметр, м.

Если установить пьезометры на трубопроводе в сечениях 1-1 и 2-2 на расстоянии L один от другого (рис. 2.11), то разность показаний пьезометров определит потерю напора по длине

$$h_L = \frac{p_1}{\gamma} - \frac{p_2}{\gamma}.$$

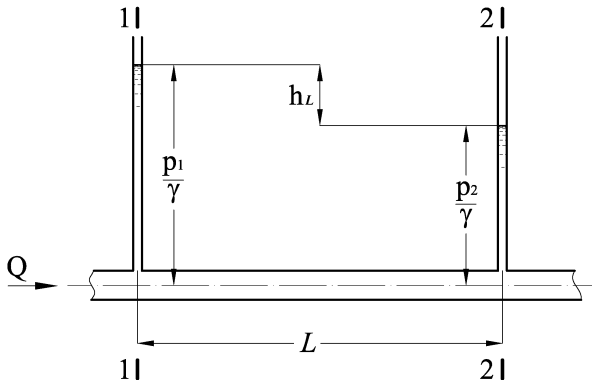


Рис. 2.11

Схема установки пьезометров

Подставив h_L в формулу Дарси — Вейсбаха, можно определить опытное значение коэффициента гидравлического трения:

$$\lambda_{\text{оп}} = \frac{2g \cdot d \cdot h_L}{L \cdot v^2}.$$

Коэффициент λ является безразмерной величиной, зависящей в общем случае от числа Рейнольдса и относительной шероховатости стенок трубы $\Delta_r = \frac{\Delta_a}{d} = \frac{\Delta_a}{4R}$ (Δ_a — эквивалентная шероховатость, мм):

$$\lambda = f(\text{Re}, \Delta_r).$$

Эта зависимость впервые была установлена опытами И. И. Никурадзе, выполненными для плотной, однородной, равнозернистой шероховатости из песка (для песочной шероховатости), нанесенной им на внутреннюю поверхность круглых труб. Результаты опытов представлены в логарифмических координатах (график И. И. Никурадзе) (рис. 2.12) и показывают весьма сложную механику течения жидкости даже в таком простом случае, как равномерное движение в круглых трубах.

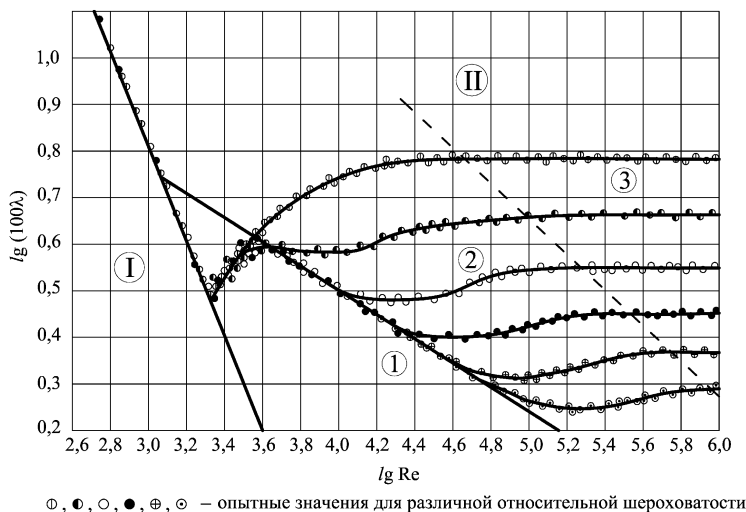


Рис. 2.12
График И. И. Никурадзе

На графике И. И. Никурадзе можно выделить две характерные зоны течения жидкости.

I зона — зона ламинарного течения имеет место при $Re < Re_{кр}$. В этой зоне весь поток сплошь является ламинарным. Выступы шероховатости плавно обтекаются потоком и поэтому их высота не оказывает какого-либо заметного влияния на коэффициент λ . В *I* зоне $\lambda = f(Re)$, причем эта функция может быть установлена теоретически и имеет вид:

$$\lambda = \frac{A}{Re},$$

где A — коэффициент формы, значения которого зависят от формы сечения (таб. 2.3).

Т а б л и ц а 2.3

Значения коэффициентов формы

Форма сечения	Коэффициент формы A
Круг диаметром d	64
Квадрат со стороной a	57
Равносторонний треугольник со стороной a	53
Кольцевой просвет шириной a	96
Прямоугольник с отношением сторон a/b :	
0,1	85
0,2	76
0,25	73
0,33	69
0,5	62

Потери напора по длине в этой зоне пропорциональны первой степени скорости течения.

$$h_L = k\nu^{1,0},$$

где k — коэффициент пропорциональности.

Исследования показали, что при числах Рейнольдса $Re = 2000...4000$ наблюдается зона неустойчивого движения, когда при незначительных возмущениях происходит переход ламинарного режима в турбулентный и обратно.

II зона — зона турбулентного режима течения жидкости имеет место при $Re > 4000$. У стенок сохраняется слой с пониженными скоростями течения и, следовательно, с сильным влиянием вязкости, в пределах которого течение остается ламинарным. Этот весьма тонкий слой называют *вязким слоем* или *вязким подслоем*, *ламинарным подслоем*, *ламинарной пленкой*. В турбулентной зоне можно выделить три области сопротивления.

Первая область — область гладкостенного сопротивления (область гидравлически гладких труб) $Re_{кр} < Re < Re_{пр}^I = \frac{10}{\Delta_r}$. При относительно небольших числах Рейнольдса

толщина ламинарной пленки сравнительно велика и оказывается больше, чем высота выступов шероховатости. Вследствие этого турбулентное ядро потока движется как бы в гладкой трубе и не испытывает никакого влияния со стороны выступов шероховатости. Поэтому коэффициент гидравлического трения λ зависит только от числа Re и может быть определен по эмпирической формуле Г. Блазиуса

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}.$$

В области гладкостенного сопротивления потери напора по длине пропорциональны скорости в степени 1,75:

$$h_L = k \cdot v^{1,75}.$$

Вторая область — область докватричного сопротивления (переходная от гидравлически гладких труб к гидравлически шероховатым) $Re_{пр}^I < Re < Re_{пр}^{II} = \frac{500}{\Delta_r}$. С увеличением числа Re скорость течения у стенок возрастает, а

толщина ламинарной пленки уменьшается и увеличивается часть выступов шероховатости, выдающихся за пределы ламинарной пленки. В этой области коэффициент гидравлического трения λ зависит как от относительной шероховатости Δ_r , так и от числа Re и определяется по формуле А. Д. Альтшуля

$$\lambda = 0,11 \left(\Delta_r + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}.$$

Как показывают опыты, величина потерь напора в области доквадратичного сопротивления пропорциональна скорости в степени 1,75...2,0

$$h_L = k \cdot v^{(1,75 \dots 2,0)}.$$

Третья область — область квадратичного сопротивления (область вполне развитого турбулентного течения, автотомельная зона) $Re \gg Re_{кр}^{II}$. Увеличение числа Re приводит к дальнейшему уменьшению толщины ламинарной пленки и при достаточно больших числах Re ее толщина практически становится равной нулю. В этих условиях каждый выступ шероховатости в полной мере способствует вихреобразованию в потоке, а влияние вязкого слоя исчезает полностью. В связи с этим коэффициент гидравлического трения λ в области квадратичного сопротивления зависит только от относительной шероховатости, а потери напора по длине оказываются пропорциональными квадрату скорости потока.

$$h_L = k \cdot v^{2,0}.$$

В области квадратичного сопротивления для определения коэффициента гидравлического трения λ используется формула Б. Л. Шифринсона

$$\lambda = 0,11 \cdot \Delta_r^{0,25}.$$

График И. И. Никурадзе имеет большое принципиальное значение для механики жидкости, так как с его помощью стало возможным рассчитывать потери при движении любых жидкостей. Однако, как отмечалось выше, И. И. Никурадзе работал с шероховатыми трубами, имеющими однозернистую (искусственную) шероховатость. На практике обычно встречаются *технические трубы*, т. е. трубы, имеющие разнотернистую шероховатость (когда выступы шероховатости имеют неодинаковую форму и размеры, расстояние между ними также различно). Поэтому вводят понятие *эквивалентная шероховатость* — высота выступов равнотернистой шероховатости из однородного песка, при которой в квадратичной области сопротивления получается такое же значение λ , что и в рассматриваемой трубе.

При расчете потерь напора по длине трубопровода наибольшую сложность представляет определение коэффициента гидравлического трения. Данный коэффициент зависит от числа Рейнольдса и относительной шероховатости стенок трубы и рассчитывается по эмпирическим формулам. Выбор конкретной расчетной формулы удобно осуществлять, используя представленную ниже схему (рис. 2.13).

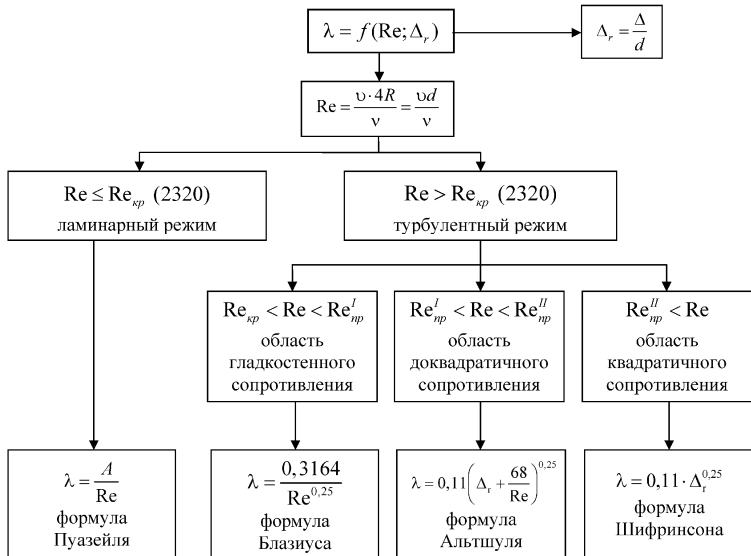


Рис. 2.13

*Схема для выбора расчетной формулы
коэффициента гидравлического трения*

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Экспериментальная установка (рис. 2.14, 2.15) состоит из напорного бака 1, горизонтальной прямолинейной трубы постоянного сечения 3 с вентилем 5 на конце, позволяющим изменять расход воды, пьезометров, подключенных в начале и конце трубы и вынесенных на пьезометрический щит 6, термометра 2. Расход воды в трубе измеряется электромагнитным расходомером 4.

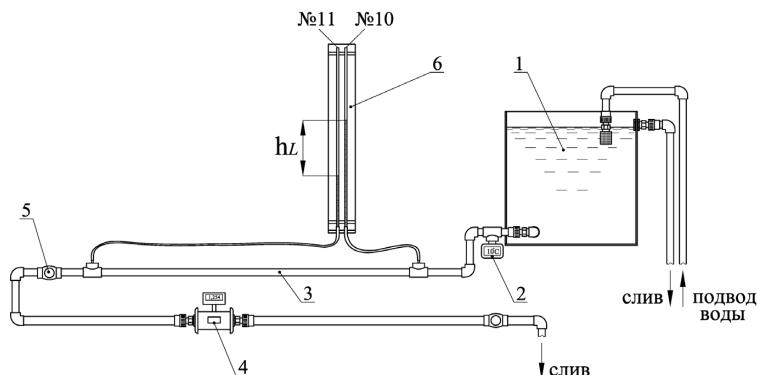


Рис. 2.14
Схема лабораторной установки

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1. Наполнить водой напорный бак 1.
2. Определить характерные параметры (внутренний диаметр, длина, эквивалентная шероховатость стенок) исследуемого участка трубы.
3. Открыть вентиль 5 и установить перепад напоров, показывающий потери энергии на исследуемом участке трубы.
4. Снять показания расходомера 4, пьезометров № 10 и № 11 и термометра 2.
5. Изменить расход воды и повторить все замеры в указанном порядке.
6. Произвести обработку опытных данных.

ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

1. Рассчитать площадь живого сечения трубы:

$$\omega = \frac{\pi d^2}{4}.$$

2. Определить эквивалентную шероховатость трубы из паспорта стенда и рассчитать относительную шероховатость по формуле:

$$\Delta_r = \frac{\Delta_s}{d}.$$

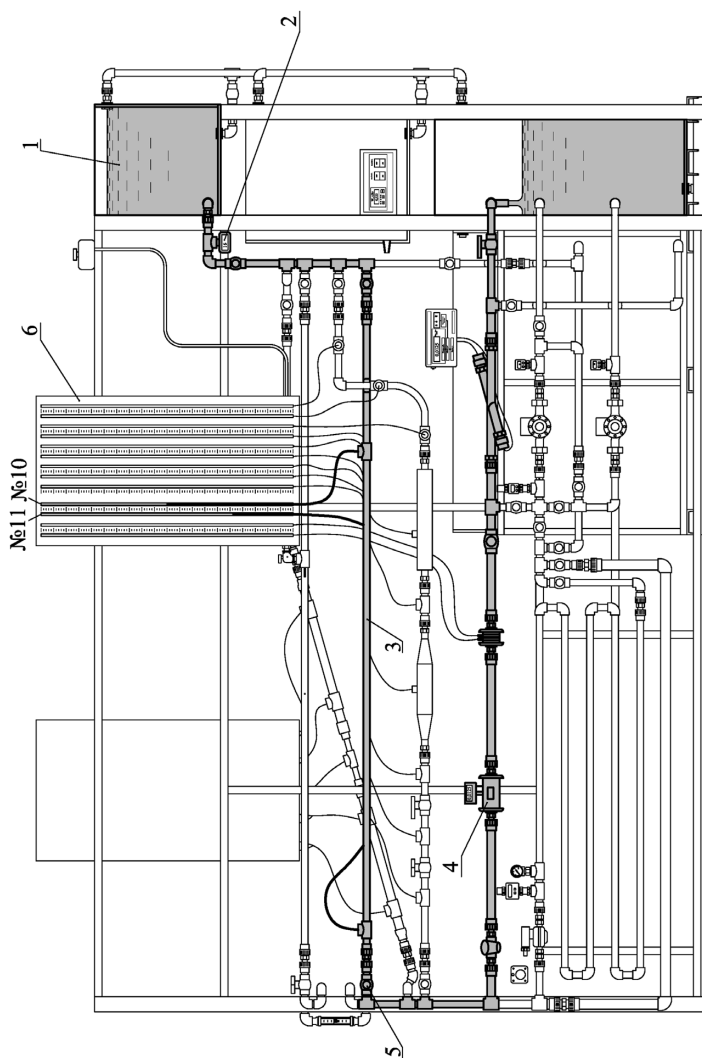


Рис. 2.15
Стенд для проведения лабораторной работы

3. Рассчитать предельные числа Рейнольдса:

$$\text{Re}_{\text{пр}}^I \approx \frac{10}{\Delta_r} \quad \text{и} \quad \text{Re}_{\text{пр}}^{II} \approx \frac{500}{\Delta_r}.$$

4. Найти потерю напора по длине как разность показаний пьезометров по зависимости:

$$h_L = \frac{p_1}{\gamma} - \frac{p_2}{\gamma}.$$

5. Определить среднюю скорость воды v по формуле

$$v = \frac{Q}{\omega}.$$

6. По графику зависимости $v = f(t, ^\circ\text{C})$ определить кинематическую вязкость воды ν (рис. 2.10).

7. Вычислить число Рейнольдса по формуле:

$$\text{Re} = \frac{vd}{\nu}.$$

8. Определить режим движения жидкости и область сопротивления.

9. Рассчитать опытное значение коэффициента гидравлического трения по длине трубы по выражению:

$$\lambda_{\text{оп}} = \frac{2g \cdot d \cdot h_L}{L \cdot v^2}.$$

10. Выбрать расчетную формулу для коэффициента гидравлического трения по длине трубы, сравнивая расчетное число Рейнольдса с критическим $\text{Re}_{\text{кр}}$ и предельными значениями $\text{Re}_{\text{пр}}^I$, $\text{Re}_{\text{пр}}^{II}$ (рис. 2.13).

11. Определить расчетный коэффициент гидравлического трения $\lambda_{\text{расч}}$ и сравнить его с опытным $\lambda_{\text{оп}}$.

12. Рассчитать относительную ошибку.

13. Сделать выводы по работе.

Т а б л и ц а 2.4

Таблица опытных данных

Наименование показателя	Обозначение	Единица измерения	Опыт	
			1	2
1. Длина трубы	L	см		
2. Диаметр трубы	d	см		

Продолжение табл. 2.4

Наименование показателя	Обозначение	Единица измерения	Опыт	
			1	2
3. Площадь живого сечения трубы	$\omega = \pi \cdot d^2 / 4$	см ²		
4. Показания пьезометров:				
№ 10	p_1/γ	см		
№ 11	p_2/γ	см		
5. Потери напора по длине трубы	$h_L = p_1/\gamma - p_2/\gamma$	см		
6. Расход воды	Q	м ³ /ч		
		см ³ /с		
7. Средняя скорость воды	$v = Q/\omega$	см/с		
8. Коэффициент гидравлического трения по длине трубы (из опыта)	$\lambda_{\text{оп}} = \frac{2g \cdot d \cdot h_L}{L \cdot v^2}$	—		
9. Температура воды	t	°С		
10. Кинематическая вязкость (по графику)	ν	см ² /с		
11. Расчетное число Рейнольдса	$Re = \nu d/\nu$	—		
12. Режим движения жидкости	—	—		
13. Область сопротивления	—	—		
14. Эквивалентная шероховатость стенок трубы	$\Delta_{\text{э}}$	см		
15. Относительная шероховатость стенок трубы	$\Delta_r = \Delta_{\text{э}}/d$	см		
16. Предельные числа Рейнольдса	$Re_{\text{пр}}^I \approx 10/\Delta_r$	—		
	$Re_{\text{пр}}^{II} \approx 500/\Delta_r$	—		
17. Расчетная величина коэффициента гидравлического трения по длине трубы	Опыт 1 $\lambda_{\text{расч}} =$	—		—
	Опыт 2 $\lambda_{\text{расч}} =$		—	
18. Относительная ошибка	δ	%		

Контрольные вопросы

1. От каких величин зависит коэффициент гидравлического трения при равномерном ламинарном движении в цилиндрической трубе?
2. Каким образом форма поперечного сечения трубы влияет на коэффициент гидравлического трения при равномерном ламинарном движении?
3. Какие области сопротивления характеризуют турбулентный режим при равномерном движении жидкости?
4. Каковы значения чисел Re , характеризующие границы областей сопротивления?
5. Дайте характеристику понятий «гидравлически гладкие» и «гидравлически шероховатые» трубы.
6. Запишите формулы для коэффициента гидравлического трения в гидравлически гладких и гидравлически шероховатых трубах (доквадратичная и квадратичная области сопротивления).
7. Что такое эквивалентная шероховатость? В каких расчетах ее используют?
8. Как определить потери напора (энергии) опытным путем?
9. Какова зависимость величины потерь напора по длине от средней скорости движения жидкости при ламинарном и турбулентном режимах движения?
10. В чем состоит практическое значение коэффициента гидравлического трения?

Лабораторная работа № 2.4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ МЕСТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучить теоретические сведения по теме лабораторной работы.
2. Определить опытным путем коэффициенты местных сопротивлений и сравнить их со справочными.
3. Сравнить опытные значения со справочными, сделать выводы по работе.

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

Местные сопротивления представляют собой короткие участки трубопроводов, вызывающие деформацию потока и являются причиной дополнительных потерь напора (вход в трубу, задвижка, вентиль, колено, клапан, тройник и т. д.). В результате изменения размеров и формы сечения или направления продольной оси потока изменяются величина и направление скорости движения жидкости, происходит интенсивное вихреобразование с отрывом потока от ограничивающих его стенок, на что затрачивается дополнительная энергия, обусловленная работой сил трения.

Потери удельной энергии потока на преодоление местных сопротивлений называются *местными потерями напора*, которые определяются по общей формуле Вейсбаха:

$$h_m = \xi \frac{v^2}{2g},$$

где h_m — местные потери напора, м; ξ — безразмерный коэффициент местных сопротивлений; v — средняя скорость потока, м/с.

Величина коэффициента местного сопротивления зависит от вида местного сопротивления, его геометрической формы и размеров.

В связи со сложностью структуры потока в местных сопротивлениях только в отдельных случаях коэффициенты местных сопротивлений определяются теоретически, в преобладающем большинстве случаев эти коэффициенты определены экспериментально.

Исследования показывают, что коэффициент местных сопротивлений зависит от числа Рейнольдса Re лишь при ламинарном режиме движения. В турбулентных потоках при достаточно больших числах Re влияние последних на коэффициенты местных сопротивлений незначительно, поэтому значения их считают зависящими только от вида и конструктивного исполнения местного сопротивления.

В случае с внезапным расширением трубопровода (рис. 2.16а) получена теоретическая зависимость для определения коэффициента сопротивления:

$$\xi_{вр1} = \left(1 - \frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2;$$

$$\xi_{вр2} = \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} - 1\right)^2.$$

При этом

$$h_{м(вр)} = \xi_{вр1} \frac{v_1^2}{2g} = \xi_{вр2} \frac{v_2^2}{2g},$$

где ω_1 и ω_2 — площади живых сечений потока до и после сопротивления, m^2 ; v_1 , v_2 — средняя скорость потока в тех же сечениях, m/c .

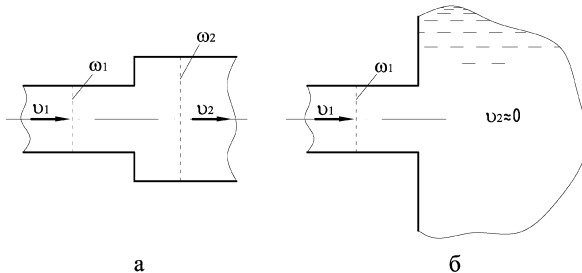


Рис. 2.16

Определение коэффициента местных сопротивлений при расширении потока:

- а* — внезапное расширение трубопровода;
б — выход из трубы в неподвижную жидкость.

Выход из трубы в неподвижную жидкость (бак, бассейн и т. д.) — частный случай внезапного расширения (рис. 2.16б) когда $\omega_2 \gg \omega_1$ и $v_2 \approx 0$. В этом случае $\xi_{\text{вых}} = 1$ и, следовательно, потери напора:

$$h_{\text{м(вых)}} = \xi_{\text{вых}} \frac{v_1^2}{2g}.$$

Внезапное сужение потока (рис. 2.17а) всегда вызывает меньшую потерю энергии, чем внезапное расширение с таким же соотношением площадей. При проведении практических расчетов для определения коэффициента местных сопротивлений в случае резкого сужения потока можно использовать следующую полуэмпирическую формулу:

$$\xi_{\text{вс}} = 0,5 \left(1 - \frac{\omega_2}{\omega_1} \right),$$

где ω_1 и ω_2 — площади живых сечений до и после сопротивлений, м^2 .

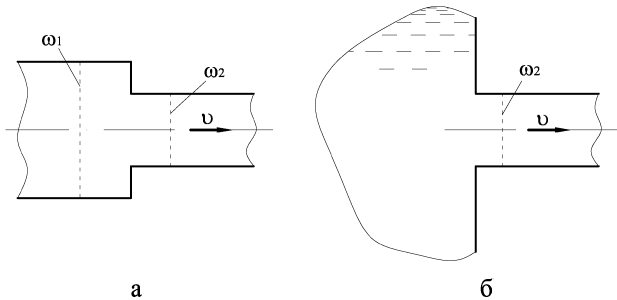


Рис. 2.17

Определение коэффициента местных сопротивлений при сужении потока:

а — внезапное сужение трубопровода;

б — вход в трубу с острыми кромками из резервуара.

Из формулы следует, что в частном случае, когда можно считать $\frac{\omega_2}{\omega_1} \approx 0$, т. е. при входе в трубу с острыми кромками из резервуара достаточно больших размеров (рис. 2.17б) коэффициент сопротивления $\xi_{\text{вх}} \approx 0,5$.

Для плавного поворота трубы круглого сечения с углом $\Theta = 90^\circ$ и $\frac{R}{d} \geq 1$ (рис. 2.18а) при турбулентном режиме дви-

жения коэффициент местных сопротивлений можно определить по эмпирической формуле:

$$\xi_{\text{пп}} = 0,051 + 0,19 \frac{d}{R},$$

где d — внутренний диаметр трубы, м; R — радиус закругления трубы, м.

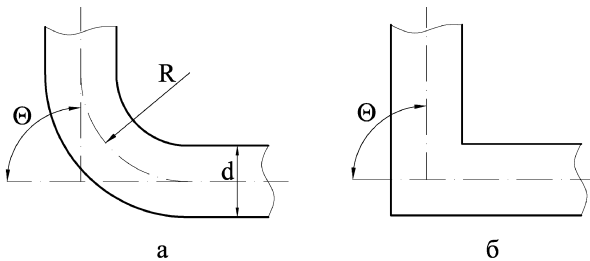


Рис. 2.18

Схемы поворотов трубы:

а — плавный; б — резкий.

Для углов $\Theta \leq 70^\circ$ коэффициент сопротивления

$$\xi_{\text{пп}} = 0,9 \sin \Theta \cdot \left(0,051 + 0,19 \frac{d}{R} \right),$$

где Θ — угол поворота потока, град,

При $\Theta \geq 100^\circ$

$$\xi_{\text{пп}} = \left(0,7 + \frac{\Theta}{90} 0,35 \right) \cdot \left(0,051 + 0,19 \frac{d}{R} \right).$$

Значения коэффициентов местных сопротивлений для резкого поворота трубы круглого сечения (рис. 2.18б) приведены в таблице 2.5.

Т а б л и ц а 2.5

**Значения коэффициентов местных сопротивлений
для резкого поворота трубы**

Θ , град	20	30	45	60	75	90	110	130	150	180
$\xi_{\text{рп}}$	0,125	0,155	0,318	0,555	0,806	1,19	1,87	2,60	3,20	3,60

Расположение местных сопротивлений на расстоянии, меньшем длины зоны влияния, приводит к их взаимному влиянию друг на друга, что обусловлено изменением распределения кинематических характеристик потока за дан-

ным сопротивлением и на подходе к сопротивлению, расположенному ниже по течению.

Взаимное влияние в зависимости от расстояния между местными сопротивлениями приводит к тому, что суммарный коэффициент местных сопротивлений может быть и меньше и больше арифметической суммы коэффициентов каждого из сопротивлений.

Длиной зоны влияния данного местного сопротивления называют длину участка, за пределами которого кинематические характеристики потока принимают вид, характерный для невозмущенного потока. При развитом турбулентном напорном движении в круглых трубах длину зоны влияния местного сопротивления приблизительно принимают равной 30...60 диаметров трубы.

Экспериментально величину потерь напора в местном сопротивлении можно определить из уравнения Бернулли, записанного для сечений, расположенных до и после местного сопротивления:

$$h_m = \left(z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha v_1^2}{2g} \right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha v_2^2}{2g} \right).$$

Если местное сопротивление находится на горизонтальном участке трубопровода постоянного сечения (рис. 2.19а), то потеря напора будет равна разности показаний пьезометров, установленных в сечениях перед и за местным сопротивлением в местах, где на поток не сказывается возмущение, налагаемое сопротивлением:

$$h_m = \frac{p_1}{\gamma} - \frac{p_2}{\gamma},$$

так как в уравнении Бернулли $z_1 = z_2 = 0$ и $v_1 = v_2$.

При внезапном сужении или внезапном расширении горизонтального трубопровода (рис. 2.19б) скорости в широком и узком сечениях различны, поэтому потери напора в этих случаях определяются из выражения:

$$h_m = \left(\frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha v_1^2}{2g} \right) - \left(\frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha v_2^2}{2g} \right).$$

Если местное сопротивление расположено на вертикальном участке трубопровода постоянного диаметра (рис. 2.20а), то потеря напора определяется из следующего выражения:

$$h_m = \left(z_1 + \frac{p_1}{\gamma} \right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\gamma} \right).$$

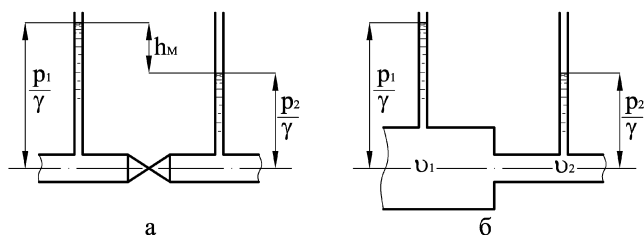


Рис. 2.19

Определение местных потерь напора в горизонтальной трубе:

а — постоянное сечение; б — переменное сечение.

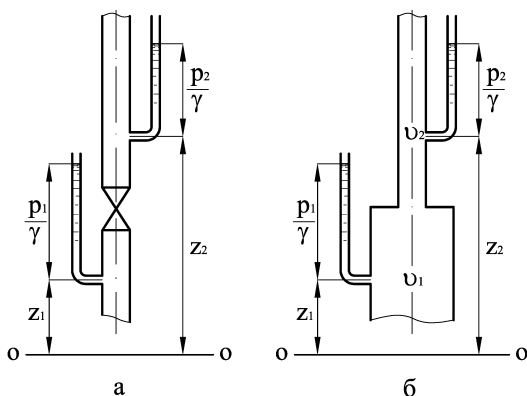


Рис. 2.20

Определение местных потерь напора в вертикальной трубе:

а — постоянное сечение; б — переменное сечение.

При внезапном сужении или внезапном расширении вертикального трубопровода (рис. 2.20б) потери напора определяются следующей зависимостью:

$$h_M = \left(z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha v_1^2}{2g} \right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha v_2^2}{2g} \right).$$

Экспериментально коэффициент местных сопротивлений определяют, используя формулу Вейсбаха:

$$\xi_{\text{оп}} = \frac{2g \cdot h_M}{v^2}.$$

Значения большинства коэффициентов местных сопротивлений определены экспериментально и приводятся в справочниках.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Экспериментальная установка (рис. 2.21, 2.22) состоит из напорного бака 1, горизонтального трубопровода 2, имеющего ряд местных сопротивлений, с вентилем 4 на конце, пьезометрического щита 5 и электромагнитного расходомера 3.

Местные сопротивления представлены резким и плавным поворотами на 90° , плавным расширением и плавным сужением, внезапным расширением и внезапным сужением, шаровым краном и вентилем.

Сечения, где поток можно считать плавно изменяющимся, до и после каждого из сопротивлений соединены с пьезометрами, расположенными по порядку номеров на пьезометрическом щите 5.

Порядковые номера пьезометров на пьезометрическом щите соответствуют нумерации точек на трубопроводе:

резкий поворот на 90° — пьезометры 1–2;

плавный поворот на 90° — пьезометры 2–3;

плавное расширение — пьезометры 3–4;

плавное сужение — пьезометры 4–5;

внезапное расширение — пьезометры 5–6;

внезапное сужение — пьезометры 6–7;

шаровой кран — пьезометры 7–8;

вентиль — пьезометры 8–9.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1. Наполнить напорный бак 1 водой.
2. Открыть вентиль 4 слива воды из трубопровода с местными сопротивлениями.
3. Записать показания пьезометров, установленных до и после исследуемых местных сопротивлений.
4. Измерить расход воды с помощью расходомера 3.
5. Произвести обработку опытных данных.

ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

1. Определить площадь сечений трубопровода:

$$\omega = \frac{\pi d^2}{4}.$$

2. Рассчитать средние скорости потока:

$$v = \frac{Q}{\omega}.$$

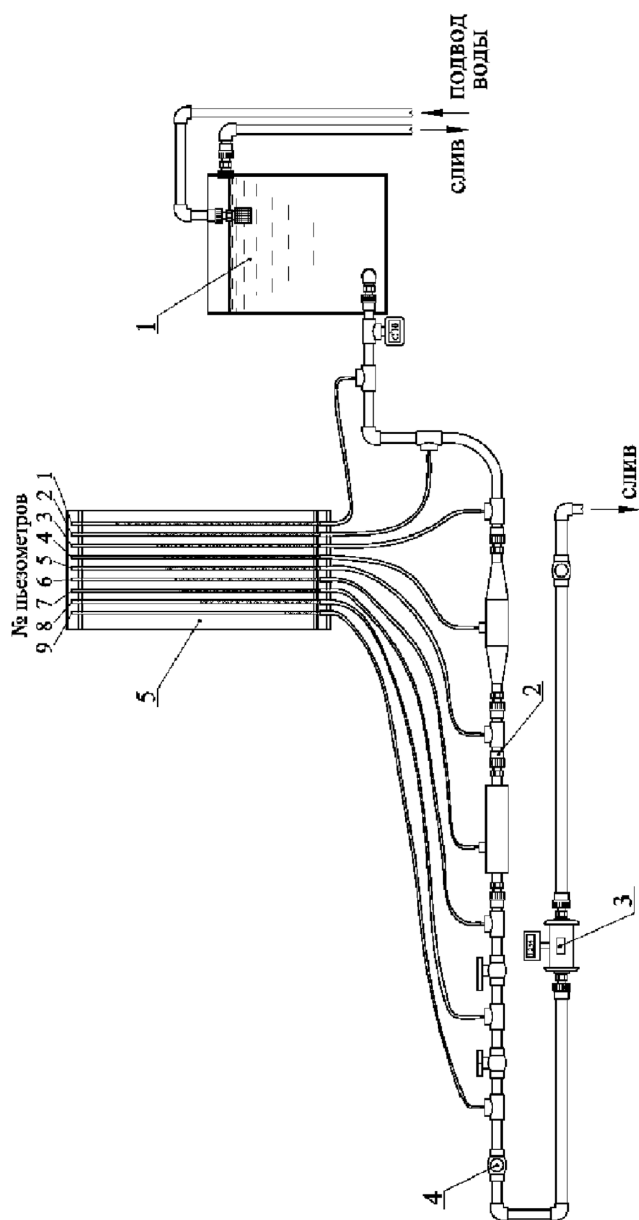


Рис. 2.21

Схема лабораторной установки

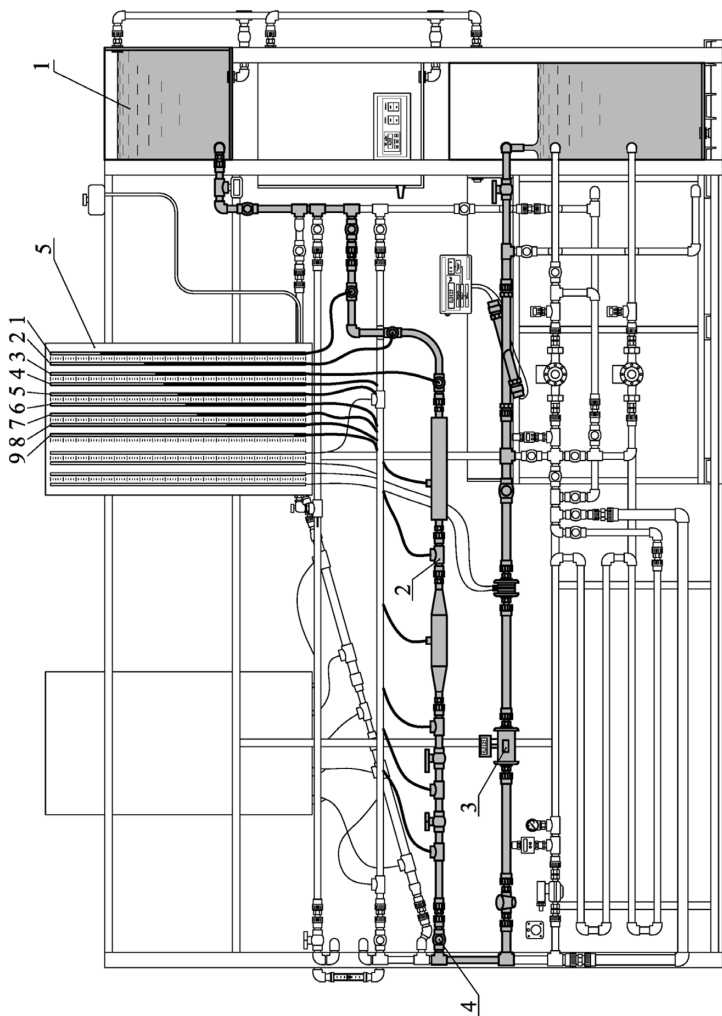


Рис. 2.22
Стенд для проведения лабораторной работы

3. Определить потери напора в местных сопротивлениях:

$$h_m = H_{p1} - H_{p2}.$$

4. Найти коэффициенты местных сопротивлений по опытным данным:

$$\xi_{\text{оп}} = \frac{2g \cdot h_m}{v^2}.$$

5. Сравнить коэффициенты $\xi_{\text{оп}}$, полученные из опыта, с данными по справочнику $\xi_{\text{сп}}$.

6. Сделать выводы по работе.

Т а б л и ц а 2.6

Таблица опытных данных

Наименование показателя	Обозначение	Единица измерения	Значения показателей на участках		
1. Диаметр трубопровода	d	см			
2. Площадь сечения трубопровода	$\omega = \frac{\pi d^2}{4}$	см ²			
3. Расход воды	Q	м ³ /ч			
		см ³ /с			
4. Средняя скорость в сечении	$v = \frac{Q}{\omega}$	см/с			
5. Показания пьезометров					
до сопротивления	$H_{p1} = z_1 + \frac{p_1}{\gamma}$	см			
после сопротивления	$H_{p2} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma}$	см			
6. Потери напора (из опыта)	$h_m = H_{p1} - H_{p2}$	см			
7. Коэффициенты местных сопротивлений (из опыта)	$\xi_{\text{оп}} = \frac{2g \cdot h_m}{v^2}$	—			
8. Коэффициенты местных сопротивлений (по справочнику)	$\xi_{\text{сп}}$	—			
9. Относительная ошибка	δ	%			

Контрольные вопросы

1. Что такое местные сопротивления?
2. Перечислите известные Вам виды местных сопротивлений.
3. Что такое местные потери напора?
4. На что тратится энергия потока при преодолении местных сопротивлений?
5. Оказывает ли влияние режим движения жидкости на значение коэффициента местных сопротивлений?
6. По какой формуле рассчитываются местные потери напора?
7. Как определяется коэффициент местного сопротивления опытным путем?
8. Влияет ли взаимное расположение местных сопротивлений на величину коэффициентов местных сопротивлений?
9. От чего зависит коэффициент местных сопротивлений при внезапном расширении потока? При внезапном сужении потока?
10. Как определить величину потерь напора, если местное сопротивление будет расположено на вертикальном участке трубопровода?

Лабораторная работа № 2.5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ РАСХОДА, СЖАТИЯ И СКОРОСТИ ПРИ ИСТЕЧЕНИИ ЖИДКОСТИ ИЗ ОТВЕРСТИЙ И НАСАДКОВ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучить основные теоретические сведения по теме лабораторной работы.
2. Определить опытным путем численные значения коэффициентов расхода, скорости и сжатия при истечении воды в атмосферу из круглого отверстия в тонкой стенке, внешнего цилиндрического и конически сходящегося насадков и сравнить опытные данные со справочными.
3. Проследить изменение формы поперечного сечения струи (*инверсию*), сделать выводы по работе.

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

Истечение жидкости через отверстия и насадки может происходить из открытых или закрытых резервуаров, при постоянном или переменном напорах, в атмосферу или в жидкую среду и т. д. Основной задачей гидравлического расчета истечений является определение *скорости истечения и расхода жидкости* для различных форм отверстий и насадков.

Истечение через малое отверстие в тонкой стенке при постоянном напоре. Различают малые и большие отверстия в тонкой и толстой стенках. *Малым* называют отверстие, характерный линейный размер которого значительно меньше напора H над его центром тяжести ($d < 0,1H$) (рис. 2.23а). Также отверстие называют *малым*, если площадь Ω смоченной части стенки резервуара, в которой расположено отверстие, значительно больше площади отверстия ω ($\Omega/\omega \geq 4$).

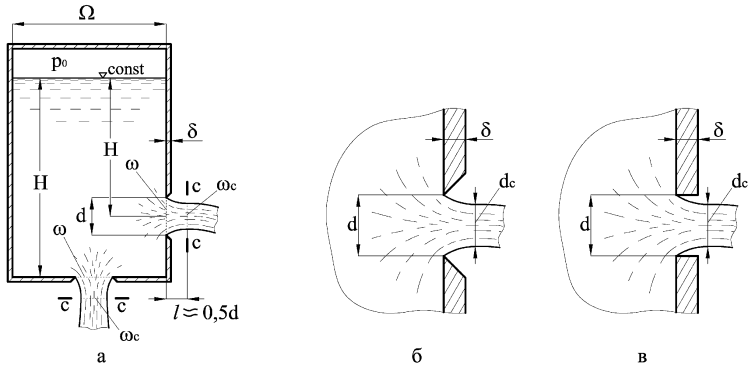


Рис. 2.23

Истечение жидкости:

- а* — через малое круглое отверстие в тонкой стенке при постоянном напоре;
б — отверстие с острой кромкой; *в* — отверстие в тонкой стенке.

Стенка считается *тонкой*, если вытекающая струя соприкасается лишь с острой кромкой отверстия, не касаясь его боковой поверхности (рис. 2.23б). Обычно к отверстиям в тонкой стенке относят случаи, когда толщина стенки δ не превышает $(2...2,5)d$.

В процессе истечения запас потенциальной энергии, которым обладает жидкость, находящаяся в резервуаре, превращается в кинетическую энергию свободной струи.

На подходе к отверстию и в плоскости отверстия частицы жидкости движутся по непараллельным между собой траекториям и, вследствие инерции частиц жидкости, на выходе из отверстия струя сжимается, а затем постепенно расширяется и под действием силы тяжести падает вниз. Как показывают исследования, на расстоянии $l \approx 0,5d$ живое сечение струи становится наименьшим, его называют *сжатым сечением* (на рисунке 2.23а сечение с-с). Степень сжатия струи оценивается *коэффициентом сжатия*:

$$\varepsilon = \frac{\omega_c}{\omega},$$

т. е. отношением площади струи в сжатом сечении ω_c к площади отверстия ω .

Скорость истечения жидкости из отверстия определяет-ся по формуле

$$v = \varphi \sqrt{2gH_0},$$

где φ — коэффициент скорости

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \xi_{\text{отв}}}},$$

который отражает влияние распределения скоростей в сжатом сечении (α) и потерь напора (ξ) в отверстии и выражает отношение действительной скорости истечения к скорости истечения идеальной жидкости через отверстие того же размера; α — коэффициент Кориолиса, принимаемый $\alpha \approx 1$, так как в сжатом сечении струи скорости практически одинаковы; $\xi_{\text{отв}}$ — коэффициент сопротивления отверстия; H_0 — напор истечения или приведенный напор

$$H_0 = H + \frac{p_0 - p}{\gamma} + \frac{\alpha v_0^2}{2g}, \quad (2.2)$$

где H — напор над центром тяжести отверстия; p_0 — давление на поверхности жидкости в резервуаре; p — давление среды, в которую вытекает жидкость; v_0 — скорость подхода жидкости к отверстию.

При истечении из малого отверстия в тонкой стенке влиянием скорости подхода v_0 и скоростным напором $\frac{\alpha v_0^2}{2g}$ можно пренебречь и принять

$$H_0 = H + \frac{p_0 - p}{\gamma}.$$

Расход вытекающей жидкости определяется по формуле

$$Q = \varepsilon \cdot \varphi \cdot \omega \sqrt{2gH_0} = \mu \omega \sqrt{2gH_0},$$

где $\mu = \varepsilon \varphi$ — коэффициент расхода.

Коэффициенты сжатия струи ε , скорости φ и расхода μ называют *коэффициентами истечения*.

При истечении жидкости из открытого резервуара в атмосферу ($p_0 = p = p_{\text{атм}}$) напор истечения $H_0 = H$ и, соответственно, расчетные формулы будут иметь вид:

$$v = \varphi \sqrt{2gH};$$

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gH}.$$

Значения коэффициентов истечения главным образом зависят от режима движения жидкости и положения отверстия относительно стенок резервуара, при этом форма отверстия и напор существенного влияния не оказывают.

В зависимости от расположения отверстия относительно стенок и дна резервуара сжатие струи может быть *полным* и *неполным*. *Полное сжатие* (рис. 2.24, I, II) характеризуется тем, что струя вытекающей жидкости испытывает сжатие по всему периметру отверстия, а при *неполном сжатии* (рис. 2.24, III) — только на некоторой его части, из чего следует, что при неполном сжатии коэффициент сжатия $\epsilon_{\text{непол}} > \epsilon_{\text{полн}}$ (при одинаковой площади отверстия ω и одинаковом напоре H_0). *Неполное сжатие* увеличивает коэффициент расхода.

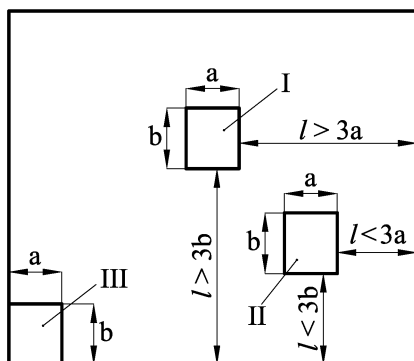


Рис. 2.24

Схема расположения отверстия
к определению сжатия струи

Полное сжатие струи может быть *совершенным* и *несовершенным*. *Совершенное сжатие* (рис. 2.24, I) наблюдается в случае, когда стенки резервуара значительно удалены от отверстия (на расстояние от любой грани отверстия до стенок и дна резервуара более трех линейных размеров отверстия $l > 3a$ и $l > 3b$) и не влияют на формирование струи. В случае расположения стенок на расстоянии $l < 3a$ или $l < 3b$ их направляющее влияние уменьшает степень сжатия струи и имеет место *несовершенное сжатие* (рис. 2.24, II); при этом коэффициенты сжатия струи и расхода возрастают, т. е. $\epsilon_{\text{несов}} > \epsilon_{\text{сов}}$ и $\mu_{\text{несов}} > \mu_{\text{сов}}$.

Таким образом, неполнота и несовершенство сжатия струи приводят к увеличению коэффициента расхода отверстия:

$$\mu_{\text{непол}} > \mu_{\text{несов}} > \mu_{\text{сов}},$$

т. е. к увеличению его пропускной способности.

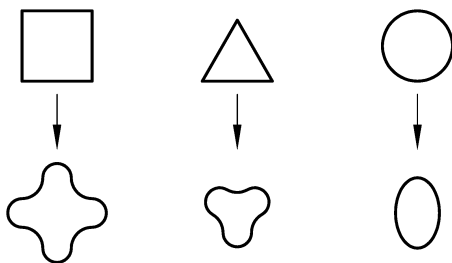


Рис. 2.25
Инверсия струи

При истечении жидкости через отверстия наблюдается изменение формы сечения струи по сравнению с формой отверстия — явление, которое называется *инверсией струи* (рис. 2.25).

Наиболее ярко это явление проявляется при истечении через отверстие полигональной формы и объясняется совместным действием сил поверхностного натяжения и инерции.

Истечение жидкости через насадки. *Насадки* — это присоединенные к отверстию короткие напорные трубки длиной $l_n = (3...4+6...7)d$, предназначенные для увеличения расхода, получения компактной дальнобойной струи или уменьшения кинетической энергии вытекающей струи.

Особенность работы насадков состоит в том, что при входе в такую трубку линии тока имеют значительную кривизну, вследствие чего во входной части насадка происходит сжатие потока, а затем постепенное его расширение до заполнения всего поперечного сечения насадка, и истечение жидкости происходит полным сечением. В области сжатого сечения возникает вакуум, «подсасывающий» жидкость из резервуара и, несмотря на увеличение потерь напора за счет расширения струи внутри насадка, расход при истечении через насадок оказывается больше, чем через отверстие в тонкой стенке (при тех же ω и H_0).

Скорость истечения жидкости через насадок (рис. 2.26) и *расход* определяются по тем же формулам, что и при истечении через отверстие:

$$v = \varphi \sqrt{2gH_0};$$

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gH_0},$$

где φ — коэффициент скорости насадка, определяемый с учетом коэффициентов местных сопротивлений на обтека-

ние острой кромки отверстия и расширения струи; μ — коэффициент расхода насадка; ω — площадь выходного сечения насадка; H_0 — напор истечения (см. формулу (2.2)) над центром тяжести выходного сечения насадка.

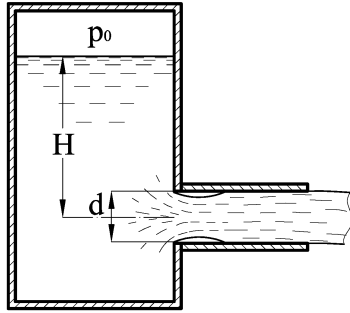


Рис. 2.26

Истечение жидкости через насадок

Наиболее распространенными видами насадков являются *цилиндрические* (внешние и внутренние, рисунок 2.27а, б), *конические* (расходящиеся и сходящиеся, рисунок 2.27в, г), *коноидальные* (вход в насадок очерчен по форме вытекающей струи, выходной участок — цилиндрический, рисунок 2.27д).

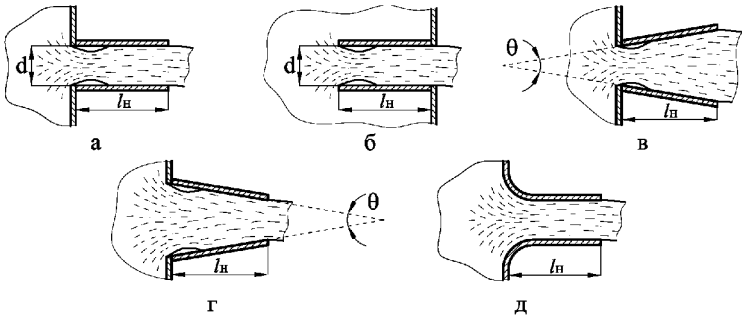


Рис. 2.27

Насадки:

- а — цилиндрический внешний; б — цилиндрический внутренний;
в — конический расходящийся; г — конический сходящийся;
д — коноидальный.

Внешний цилиндрический насадок (насадок Вентури) представляет собой короткую трубку длиной $(3...4)d$, соединенную под прямым углом к отверстию в стенке резер-

вуара. При входе в насадок струя подвергается некоторому сжатию ($d_{\text{сж}} \approx 0,8d$), образуется сжатое сечение. Затем струя постепенно расширяется до размеров выходного сечения насадка и коэффициент сжатия струи, отнесенный к выходному сечению, $\varepsilon = 1$, а коэффициент расхода и коэффициент скорости оказываются равными $\mu = \varphi = 0,82$.

Наибольший вакуум в насадке возникает в сжатом сечении, при этом его величина ограничивается возможным наименьшим давлением, которое не должно быть меньше давления насыщенных паров жидкости $p_{\text{н.п}}$ при температуре в условиях истечения. *Величина вакуума в сжатом сечении* определяется из уравнения Бернулли для сжатого и выходного сечений, из которого следует зависимость $h_{\text{вак}}$ от напора истечения:

$$h_{\text{вак}} = \frac{p_{\text{ат}} - p_{\text{с}}}{\gamma} \approx 0,75H_0.$$

Обычно значение вакуума в насадке не должно превышать 7,0...8,0 м вод. ст., следовательно, напор в резервуаре должен быть не более $H_{\text{пред}} \approx 10,7$ м вод. ст. При $H_0 > 10,7$ м вод. ст. и, соответственно, при $h_{\text{вак}} > 8$ м вод. ст. произойдет срыв вакуума и насадок перестанет работать полным сечением — истечение становится таким же, как через отверстие в тонкой стенке с теми же значениями коэффициентов истечения. Срыв вакуума в насадке возможен также при недостаточной его длине ($l < 3d$).

Сопоставляя значения коэффициентов истечения насадка Вентури и круглого отверстия в тонкой стенке, можно сделать вывод, что подключение к отверстию насадка (при том же напоре H) увеличивает расход на $\approx 32\%$ и уменьшает скорость истечения на $\approx 15\%$.

Внутренний цилиндрический насадок (насадок Борда) подключается внутри резервуара и отличается от внешнего худшими условиями подхода жидкости к насадку. Линии тока при входе в насадок искривляются в большей степени, что приводит к большему сжатию струи и увеличению гидравлических сопротивлений. Значения коэффициентов расхода и скорости внутреннего цилиндрического насадка ниже, чем у внешнего насадка.

Конически расходящийся насадок выполняется с углом конусности $\Theta = 5...7^\circ$. На входе в насадок струя жидкости испытывает значительное сжатие, затем быстро расширяется и заполняет все выходное сечение ($\varepsilon = 1$). Вакуум в сжа-

том сечении расходящегося насадка больше, чем в сжатом сечении насадка Вентури. При угле конусности $\Theta > 7^\circ$ увеличивается вакуум в сжатом сечении, происходит его срыв и насадок перестает работать полным сечением, истечение происходит как из отверстия в тонкой стенке. Коэффициенты истечения изменяются в зависимости от угла конусности; в среднем при $\Theta = 5...7^\circ$ и острой кромке входного отверстия рекомендуется принимать $\mu = \varphi \approx 0,45$. Несмотря на большие потери напора при резком сжатии и расширении струи внутри расходящегося насадка, расход оказывается значительно выше, чем при истечении через внешний цилиндрический насадок при прочих одинаковых условиях. Скорость истечения в конически расходящихся насадках является наименьшей по сравнению с насадками других типов. Эти насадки применяют при необходимости пропустить значительный расход при малых скоростях на выходе (отсасывающие трубы гидравлических турбин и т. п.) или в устройствах, когда необходимо достичь значительного вакуума (водоструйные насосы и т. п.). Выполнив входную часть насадка по форме вытекающей струи, можно достичь наибольшего возможного увеличения расхода.

Конически сходящийся насадок имеет форму усеченного по направлению к выходному сечению конуса. Сжатие струи при входе в сходящийся насадок меньшее, чем в насадке Вентури, однако при выходе из насадка происходит второе (внешнее) сжатие, после чего жидкость течет параллельными струйками. Вследствие незначительного внутреннего сжатия струи и дополнительного сжатия в выходном сечении коэффициент сжатия струи оказывается $\varepsilon < 1$, а коэффициенты расхода и скорости $\mu \neq \varphi$.

Коэффициент расхода достигает максимального значения $\mu = 0,946$ при угле конусности $\Theta = 13^\circ 24'$, а затем начинает убывать из-за увеличения сжатия струи на выходе из насадка. Вытекающая из насадка струя обладает большой кинетической энергией, что позволяет применять их в пожарных брандспойтах, соплах турбин, гидромониторах и т. п.

Коноидальный насадок имеет форму, близкую к форме струи, вытекающей из отверстия в тонкой стенке. Внутренне сжатие струи в этих насадках оказывается наименьшим, а на выходе сжатие отсутствует ($\varepsilon = 1$) и $\mu = \varphi$. Отсутствие вакуума в насадке обеспечивает устойчивое истечение без кавитации. Коноидальные насадки обеспечивают

наибольшие выходные скорости и расходы по сравнению с насадками других типов. При тщательном выполнении внутренней поверхности коэффициенты истечения могут достигать максимальных значений $\mu = \varphi = 0,995$.

Экспериментальное определение коэффициентов истечения. При истечении жидкости через отверстия и насадки в атмосферу расход определяется по формуле:

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gH},$$

где H — напор над центром тяжести отверстия или выходного сечения насадка; ω — площадь отверстия или выходного сечения насадка; μ — коэффициент расхода отверстия или насадка.

Коэффициент расхода μ объединяет коэффициенты скорости φ и сжатия струи ε :

$$\mu = \varepsilon \varphi.$$

Коэффициент сжатия струи ε зависит от условий сжатия и определяется отношением

$$\varepsilon = \frac{\omega_c}{\omega},$$

где ω_c — площадь сжатого живого сечения струи, м^2 .

Если к отверстию подключен насадок, то сжатое сечение оказывается внутри насадка, а на выходе из него сжатие струи отсутствует и поэтому коэффициент сжатия $\varepsilon = 1$. При этом коэффициент расхода насадка $\mu = \varphi$.

Коэффициент скорости φ зависит от распределения скоростей в живом сечении струи и от сопротивлений при истечении через отверстия или насадки:

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \xi}},$$

где α — коэффициент кинетической энергии (коэффициент Кориолиса); ξ — коэффициент сопротивлений (см. выше).

Из приведенных зависимостей видно, что коэффициенты истечения μ , φ и ε не могут превышать 1.

Значения коэффициентов расхода, скорости и сжатия могут быть определены опытным путем.

Коэффициент расхода μ рассчитывается из формулы расхода жидкости при истечении из малого отверстия в тонкой стенке, по известной площади ω отверстия или выходного сечения насадка, и измеренным на лабораторной

установке напору H над центром тяжести отверстия и расходу жидкости Q , вытекающей из отверстия или насадка, определенных объемным или весовым способом

$$\mu = \frac{Q}{\omega \sqrt{2gH}}.$$

Коэффициент скорости ϕ может быть определен на основании измеренных координат (горизонтальной x и вертикальной y) вытекающей струи (рис. 2.28). При истечении в атмосферу траекторию струи жидкости, без учета сопротивления воздуха, можно считать параболической. Принимая за начало координат центр тяжести сжатого сечения и направляя ось x — горизонтально, ось y — вертикально вниз (рис. 2.28), уравнения движения для свободного падения струи можно написать в виде:

$$x = vt; \quad y = \frac{gt^2}{2},$$

где v — скорость движения жидкости в горизонтальном направлении; t — время движения от начала координат до рассматриваемого сечения струи.

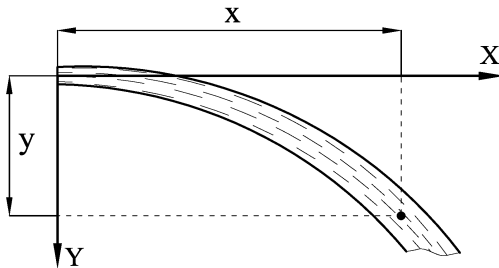


Рис. 2.28

Схема к определению координат струи при истечении

Совместное решение этих уравнений позволяет получить уравнение параболы истечения

$$y = \frac{gx^2}{2v^2},$$

из которого находится действительная средняя скорость истечения

$$v = x \cdot \sqrt{\frac{g}{2y}}.$$

Тогда коэффициент скорости можно вычислить по формуле:

$$\varphi = \frac{x}{2\sqrt{yH}}.$$

Коэффициент сжатия ε может быть определен двумя способами: вычислением по найденным выше коэффициентам расхода и скорости

$$\varepsilon = \frac{\mu}{\varphi}$$

или непосредственным измерением размеров струи в сжатом сечении $\varepsilon = \frac{\omega_c}{\omega}$.

Если применяется второй способ, то коэффициент скорости φ может быть рассчитан по найденным опытным значениям коэффициентов расхода и сжатия струи:

$$\varphi = \frac{\mu}{\varepsilon}.$$

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Экспериментальная установка (рис. 2.29, 2.30) состоит из напорного бака 1 с вмонтированными в стенку насадками 2 и приемных баков 4. Истечение жидкости происходит одновременно из всех насадков в индивидуальные приемные баки. Измерения координат струй жидкости производятся в плоскости столешницы, установленной над приемными баками, с использованием вмонтированной в нее линейки 3 и специального приспособления 5 (указателя). Для определения расхода используют секундомер и, в качестве мерной емкости, приемные баки. Напор над центром отверстия указывает линейка 7, установленная на стенке прозрачного напорного бака, начало шкалы линейки соответствует уровню центров тяжести отверстий.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1. Наполнить напорный бак 1 водой (постоянный уровень воды поддерживается за счет перелива жидкости).
2. Перекрыть слив из приемного бака 4, установленного напротив отверстия в тонкой стенке, краном 6.

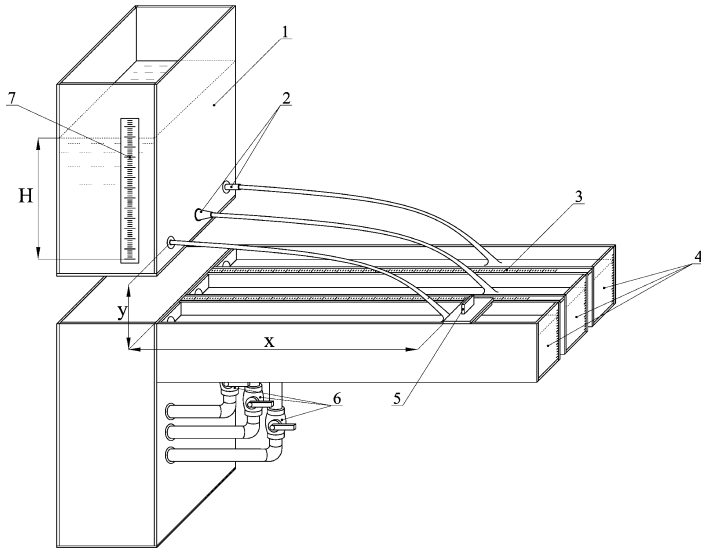


Рис. 2.29
Схема лабораторной установки

3. Измерить время, за которое в бак 4 наберется фиксированный объем воды (например 10 л). Объем воды в баке измеряется по шкале, расположенной в торцевой части бака.

4. Открыть слив из приемного бака, установленного напротив отверстия в тонкой стенке, краном 6.

5. Измерить напор H над центром отверстия по линейке 7, установленной на напорном баке 1.

6. Измерить координаты струи « x » и « y ».

« x » — дальность отлета струи от кромки отверстия до плоскости стола (измеряется с помощью вмонтированной в столешницу линейки 3 и указателя 5);

« y » — вертикальная координата центра тяжести отверстия над плоскостью стола (фиксированное расстояние, указанное в паспорте установки).

7. Повторить опыт с конически сходящимся насадком, выполнив пп. 2–6.

8. Повторить опыт с внешним цилиндрическим насадком, выполнив пп. 2–6.

9. Результаты измерений занести в таблицу опытных данных.

10. Провести наблюдение за инверсией струи.

11. Произвести обработку опытных данных.

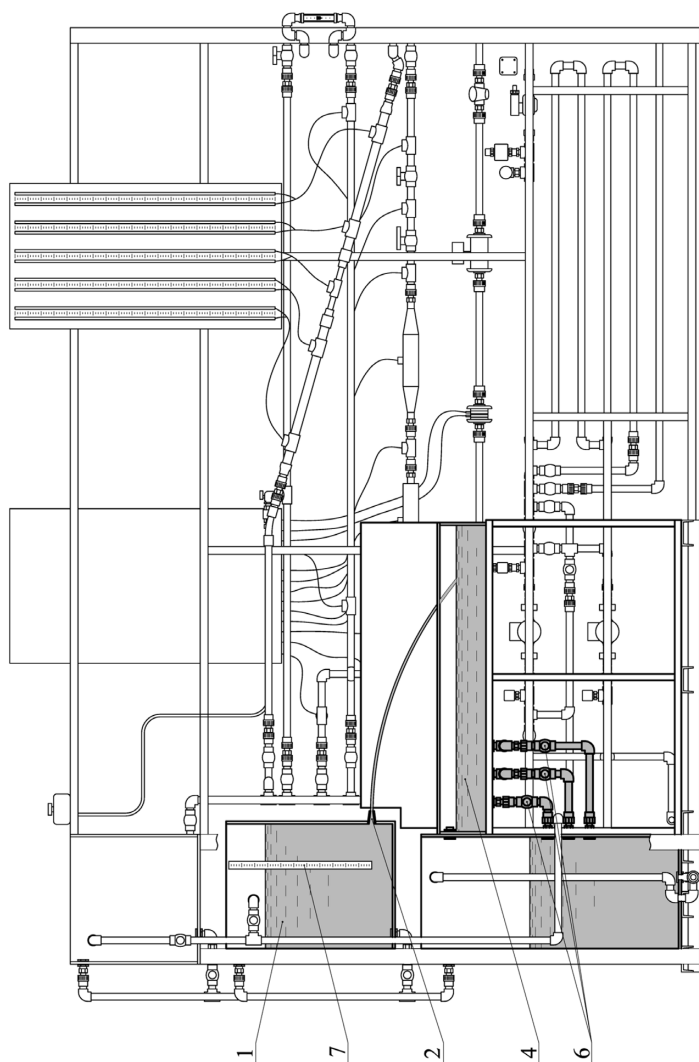


Рис. 2.30
Стенд для проведения лабораторной работы

ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

1. Рассчитать площадь отверстия и выходного сечения насадков

$$\omega = \frac{\pi d^2}{4},$$

где d — диаметр, см.

2. Определить расход истечения:

$$Q = \frac{W}{t},$$

где W — объем воды в мерном баке, см³; t — время наполнения мерного бака, с.

3. Рассчитать опытные значения коэффициентов расхода μ :

$$\mu_{\text{оп}} = \frac{Q}{\omega \sqrt{2gH}}.$$

4. Рассчитать значения коэффициентов скорости:

$$\varphi_{\text{оп}} = \frac{x}{2\sqrt{yH}}.$$

5. Коэффициенты сжатия струи определить по формуле:

$$\varepsilon_{\text{оп}} = \frac{\mu}{\varphi}.$$

6. Сравнить опытные значения коэффициентов $\mu_{\text{оп}}$, $\varphi_{\text{оп}}$, $\varepsilon_{\text{оп}}$ со справочными (табл. 2.7).

7. Сделать выводы по работе.

Т а б л и ц а 2.7

Значения коэффициентов истечения

Тип отверстия или насадка	Коэффициенты		
	ε	φ	μ
Круглое отверстие в тонкой стенке	0,64	0,97	0,62
Внешний цилиндрический насадок	1,0	0,82	0,82
Конически сходящийся насадок (угол конусности $\theta^\circ = 12...15^\circ$)	0,98	0,96	0,94

Таблица опытных данных

Наименование показателя	Обозначение	Единица измерения	Значения показателей в опытах		
			Отверстие в тонкой стенке	Конически сходящийся насадок	Цилиндрический насадок
1. Диаметр отверстия (сечения)	d	см			
2. Площадь отверстия (сечения)	$\omega = \frac{\pi d^2}{4}$	см ²			
3. Объем воды в мерном баке	W	л			
		см ³			
4. Время наполнения мерного бака	t	с			
5. Расход истечения	$Q = \frac{W}{t}$	см ³ /с			
6. Координаты струи	y	см			
	x	см			
7. Напор над центром тяжести отверстия (сечения)	H	см			
8. Коэффициент расхода (из опыта)	$\mu_{\text{оп}} = \frac{Q}{\omega \sqrt{2gH}}$	—			
9. Коэффициент скорости (из опыта)	$\varphi_{\text{оп}} = \frac{x}{2\sqrt{yH}}$	—			
10. Коэффициент сжатия (из опыта)	$\varepsilon_{\text{оп}} = \frac{\mu}{\varphi}$	—			
11. Коэффициент расхода (по справочнику)	$\mu_{\text{спр}}$	—			
12. Коэффициент скорости (по справочнику)	$\varphi_{\text{спр}}$	—			
13. Коэффициент сжатия (по справочнику)	$\varepsilon_{\text{спр}}$	—			

Продолжение табл. 2.8

Наименование показателя	Обозначение	Единица измерения	Значения показателей в опытах		
			Отверстие в тонкой стенке	Конически сходящийся насадок	Цилиндрический насадок
14. Относительная ошибка δ для:					
коэффициента расхода	δ_μ	%			
коэффициента скорости	δ_ϕ				
коэффициента сжатия	δ_ϵ				

Контрольные вопросы

1. При выполнении каких условий отверстие называют малым в тонкой стенке?

2. Запишите формулы для определения скорости и расхода жидкости при истечении из малого отверстия в тонкой стенке в атмосферу. Дайте характеристику каждому параметру в этих формулах.

3. Какие виды сжатия струи возможны при истечении жидкости из малого отверстия в тонкой стенке? Каким образом вид сжатия струи влияет на пропускную способность отверстия?

4. От чего зависит скорость истечения и расход жидкости при истечении из малого отверстия в тонкой стенке под уровень? Изменяются ли в этом случае значения коэффициентов истечения?

5. Что понимается под инверсией струи?

6. Какое устройство называют насадком? Какие виды насадков широко применяются в практике? Дайте краткую характеристику каждому из них.

7. Почему при одинаковых напоре и диаметре расход жидкости при истечении через насадок оказывается больше, чем через малое отверстие в тонкой стенке?

8. Чем отличаются формулы для определения скорости и расхода жидкости при истечении в атмосферу из насадков и малых отверстий в тонкой стенке?

9. Каковы значения вакуумметрической высоты во внешнем цилиндрическом насадке? При каких предельных значениях напора может произойти срыв вакуума?

10. Как определяются коэффициенты сжатия струи, скорости и расхода при истечении жидкости из отверстий и насадков опытным путем?

Лабораторная работа № 2.6

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСХОДА ЖИДКОСТИ. РАСХОДОМЕРЫ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучить теоретические сведения по теме лабораторной работы.

2. Определить опытным путем объемный расход жидкости, протекающей по напорному трубопроводу, сделать выводы по работе.

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

Расход жидкости — количество жидкости, протекающее через нормальное сечение в единицу времени.

В зависимости от единиц измерения различают расходы: объемный, массовый и др.

Объемный расход

$$Q = \frac{W}{t}, \quad (2.3)$$

где W — объем жидкости; t — время.

В системе СИ объемный расход измеряется в м³/с.

Исходя из того, что $W = \omega \cdot l$ (где ω — площадь сечения, м²; l — расстояние, проходимое частицей жидкости за время t) формулу (2.3) можно представить как

$$Q = \omega \cdot v,$$

где v — средняя скорость потока в данном сечении, м/с.

Если движение установившееся, отсутствует приток и отток капельной жидкости между рассматриваемыми сечениями 1-1, 2-2, ..., n - n , то расход согласно уравнению

неразрывности на данном участке является постоянным (рис. 2.31), поэтому

$$Q = \omega_1 \cdot v_1 = \omega_2 \cdot v_2 = \dots = \omega_n \cdot v_n = \text{const.} \quad (2.4)$$

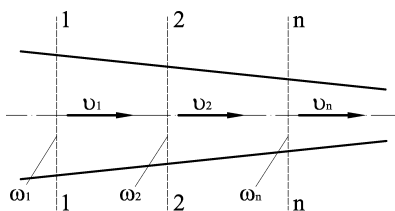


Рис. 2.31

Схема для пояснения уравнения
неразрывности движения для потока

Из уравнения (2.4) следует, что

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\omega_2}{\omega_1},$$

т. е. средние скорости в сечениях потока каплевой жидкости обратно пропорциональны их площадям.

Массовый расход:

$$M = \rho \cdot Q.$$

В системе СИ массовый расход измеряется в кг/с.

Расходомер — измерительный прибор, или совокупность приборов, предназначенный для измерения расхода жидкости.

Счетчик количества (или просто счетчик) — измерительный прибор, предназначенный для измерения объема (массы) жидкости, протекающей в трубопроводе через сечение, перпендикулярное направлению скорости потока.

Расходомер-счетчик — измерительный прибор, предназначенный для измерения расхода и объема (массы) жидкости.

Преобразователь расхода — устройство, непосредственно воспринимающее измеряемый расход (например, диафрагма, сопло, напорная трубка и т. п.) и преобразующее его в другую величину (например, перепад давления), удобную для измерения.

Классификация расходомеров и счетчиков приведена в ГОСТ 15528-86 «Средства измерения расхода, объема или массы протекающих жидкости и газа. Термины и определения».

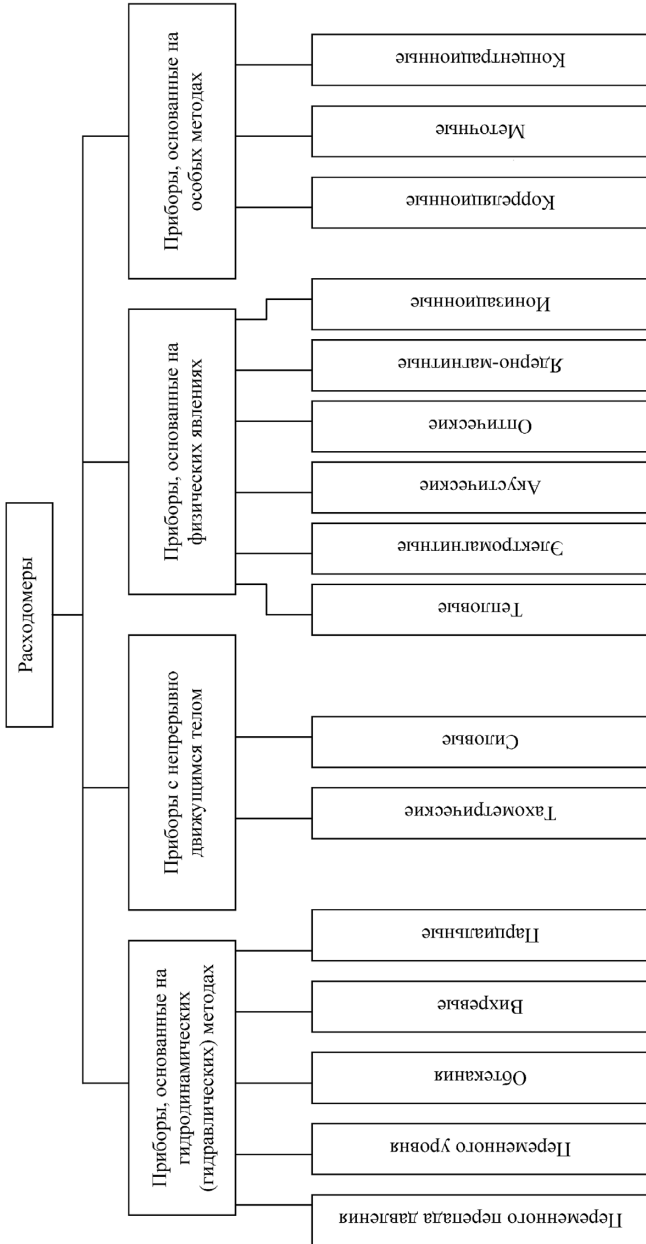


Рис. 2.32

Классификация расходомеров

Условно расходомеры и счетчики подразделяются на следующие группы (рис. 2.32):

- приборы, основанные на гидродинамических (гидравлических) методах;
- приборы с непрерывно движущимся телом;
- приборы, основанные на различных физических явлениях;
- приборы, основанные на особых методах измерения.

Расходомеры переменного перепада давления с сужающим устройством сопло Вентури применяются для непосредственного измерения расхода установившегося потока жидкости в напорных трубопроводах. Такой расходомер (рис. 2.33) состоит из двух конических участков трубы: суживающего — конфузора и расширяющегося — диффузора, соединенных цилиндрическим участком, диаметр которого значительно меньше диаметра основного трубопровода. Водомер «врезают» в трубопровод, т. е. участок трубопровода заменяют расходомером. В сечениях 1-1 и 2-2 присоединяют пьезометры или дифманометр, по показаниям которого и определяется разность гидростатических напоров.

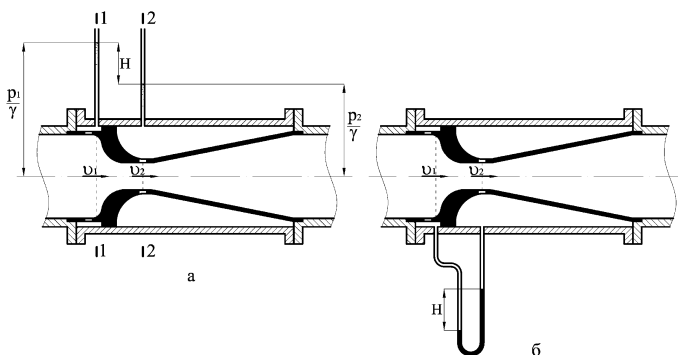


Рис. 2.33

Схема расходомера с соплом Вентури:

а — с пьезометрами; б — с ртутным дифманометром.

Применение сопла Вентури основано на измерении вызываемого им перепада давлений перед сужением в сечении 1-1 и в сжатом сечении 2-2 (рис. 2.33а).

Уравнение Бернулли для указанных сечений без учета потерь напора (плоскость сравнения 0-0 проходит через горизонтальную ось сопла) имеет следующий вид

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha v_2^2}{2g}, \quad (2.5)$$

где p_1 и p_2 — давления в центрах тяжести сечений 1-1 и 2-2; α — коэффициент Кориолиса; v_1 и v_2 — средние скорости в сечениях 1-1 и 2-2.

Из условия неразрывности потока (формула (2.4)), получаем

$$v_2 = v_1 \cdot \frac{\omega_1}{\omega_2} = v_1 \cdot \left(\frac{D}{d_B} \right)^2, \quad (2.6)$$

где ω_1 и ω_2 — площади сечений 1-1 и 2-2 трубопровода; D — диаметр трубопровода; d_B — диаметр сжатого сечения.

Подставим значение скорости v_2 из уравнения (2.6) в уравнение (2.5) и выразим из него v_1 :

$$v_1 = \frac{1}{\sqrt{\alpha \cdot \left(\left(\frac{D}{d_B} \right)^4 - 1 \right)}} \cdot \sqrt{2g \left(\frac{p_1}{\gamma} - \frac{p_2}{\gamma} \right)}.$$

Расход жидкости

$$Q = v_1 \cdot \omega_1 = \frac{\frac{\pi D^2}{4}}{\sqrt{\alpha \cdot \left(\left(\frac{D}{d_B} \right)^4 - 1 \right)}} \cdot \sqrt{2g \left(\frac{p_1}{\gamma} - \frac{p_2}{\gamma} \right)}. \quad (2.7)$$

Потери энергии при движении жидкости через прибор учтем введением в формулу (2.7) *коэффициента расхода водомера* $\mu < 1$. Этот коэффициент определяется экспериментально (рис. 2.34).

С учетом потерь энергии

$$Q = \mu \cdot \frac{\frac{\pi D^2}{4}}{\sqrt{\alpha \cdot \left(\left(\frac{D}{d_B} \right)^4 - 1 \right)}} \cdot \sqrt{2g \left(\frac{p_1}{\gamma} - \frac{p_2}{\gamma} \right)}.$$

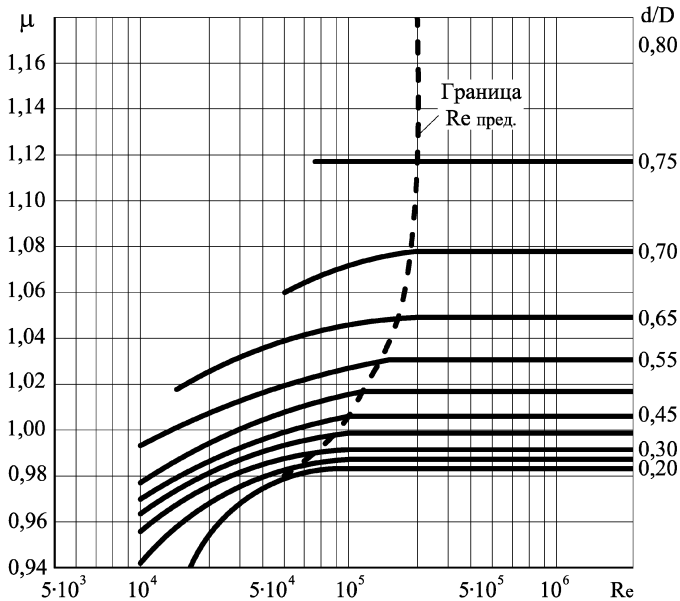


Рис. 2.34

Значения коэффициента μ для сопла Вентури

$$\text{Величина } \mu \cdot \frac{\frac{\pi D^2}{4}}{\sqrt{\alpha \cdot \left(\left(\frac{D}{d_v} \right)^4 - 1 \right)}} \cdot \sqrt{2g} = A \quad \text{для данного водо-}$$

мера будет являться величиной постоянной и называется *постоянная водомера*.

Для труб Вентури с коническим входом коэффициент μ принимают равным 0,96–0,98.

$$\text{Разность пьезометрических высот } \frac{p_1}{\gamma} - \frac{p_2}{\gamma} = H.$$

В итоге получим формулу для определения расхода жидкости

$$Q = A \cdot \sqrt{H}. \quad (2.8)$$

Расходомеры переменного перепада давления с сужающим устройством диафрагма. Измерение расхода жидкости в трубопроводах производится диафрагмами, вставляемыми между фланцами трубопровода (рис. 2.35).

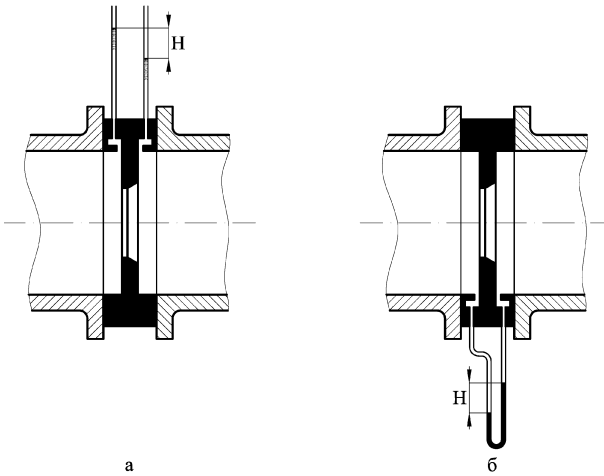


Рис. 2.35

Водомер-диафрагма с пьезометрами (а),
с дифференциальным манометром (б)

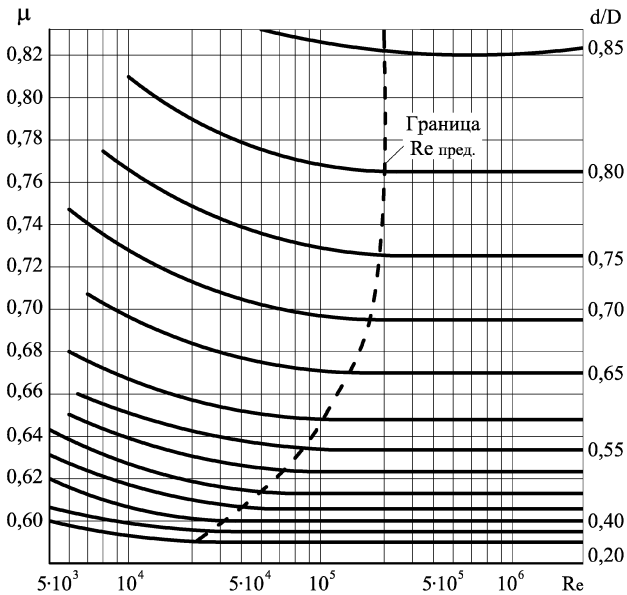


Рис. 2.36

Значение коэффициента μ для диафрагмы

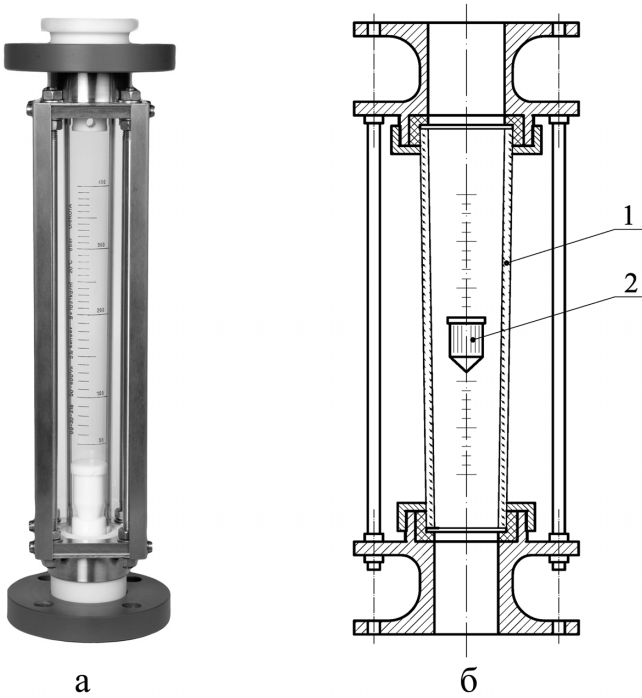


Рис. 2.37
Ротаметр:

а — внешний вид ротаметра; б — конструктивная схема.

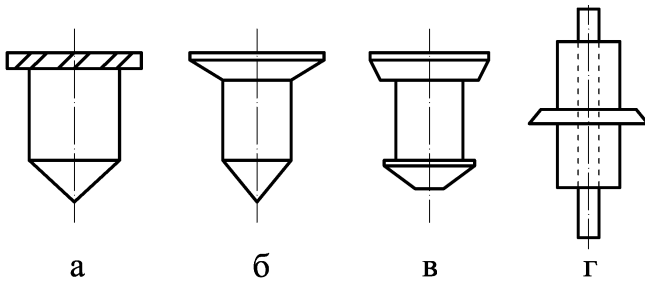


Рис. 2.38
Формы поплавков:

а — классический; б — классический с уменьшенной верхней частью и диаметром цилиндра; в — катушечный; г — дисковый с направляющей.

Перепад давлений измеряется либо пьезометрами, либо дифманометром в сечениях непосредственно перед диафрагмой и за ней. Поток жидкости, проходя через отверстие диафрагмы, подвергается внезапному сужению, а затем расширению. Наименьшую площадь сечения струя жидкости будет иметь сразу же за диафрагмой, но вблизи от нее.

Для определения расхода жидкости с помощью водомера-диафрагмы, так же как и для сопла Вентури, используют формулу (2.8). В этом случае значение коэффициента расхода μ будет другим (рис. 2.36).

Расходомеры переменного перепада давления применяются для измерения расхода жидкости, газа и пара. Приборы этой группы обладают значительными гидравлическими сопротивлениями, вызывающими большие потери напора в измеряемом потоке. Кроме того, в самом узком сечении этих расходомеров может возникнуть кавитация, что исключает возможность их использования при больших расходах. Для получения должной точности измерений перед расходомером должен быть прямой участок трубопровода достаточной длины. Применение этих приборов ограничивается областями, где требуется относительно невысокая точность измерения.

Ротаметры — приборы, относящиеся к расходомерам обтекания с постоянным перепадом давления, служащие для измерения объемного расхода жидкости или газа.

Ротаметр состоит из конической трубки 1, расходящейся вверх, длина которой обычно находится в пределах от 70 до 600 мм, диаметр — от 1,5 до 100 мм, внутри которой перемещается поплавок 2, удельный вес которого больше удельного веса протекающей жидкости (рис. 2.37). Поплавок может иметь различные формы. Классическая форма имеет конусную нижнюю часть (иногда с несколько скругленным носом), цилиндрическую среднюю часть и дисковый верх (рис. 2.38).

При движении жидкости снизу вверх через коническую трубку, помещенный внутри нее поплавок поднимается или опускается до тех пор, пока сила его тяжести не уравновешивается выталкивающей силой. Вследствие этого каждому значению расхода жидкости, проходящей через ротаметр при определенной плотности и вязкости, соответствует вполне определенное положение поплавка.

Ротаметры выпускают со шкалой для местных измерений и без шкал (с дистанционной электрической или пнев-

матической системой передачи показаний). Первые выпускаются стеклянными, а вторые — металлическими.

Стеклянные ротаметры имеют диаметр условного прохода 4–40 мм с верхними пределами измерения расхода по воде 0,025–3 м³/ч.

Ротаметры с электрической дистанционной передачей показаний имеют диаметр условного прохода 6–100 мм с верхними пределами измерения расхода по воде 0,025–16 м³/ч.

Эти приборы используются для измерения малых расходов различных жидкостей и газов (в частности, агрессивных), неньютоновских сред.

Расходомеры данного типа применяются для измерения мгновенного и среднего значения объемного расхода топлива при определении технического состояния дизелей тракторов, комбайнов, автомобилей; входят в состав измерителя расхода топлива автотракторных двигателей.

Вихревые расходомеры — приборы, основанные на зависимости частоты колебаний давления, возникающей в потоке в процессе вихреобразования или колебаний струи от расхода жидкости. Эти приборы предназначены для измерения объемного расхода. Принцип действия вихревых расходомеров основан на таком физическом явлении, как «вихревая дорожка Кармана».

Тело, находящееся на пути потока, изменяет направление движения обтекающих его струй и увеличивает их скорость за счет соответствующего уменьшения давления (рис. 2.39). За миделевым сечением тела (наибольшим по площади сечением тела, перпендикулярным направлению движения) начинается обратный процесс уменьшения скорости и увеличения давления. Пограничный слой жидкости, обтекающий тело, пройдя его миделево сечение, отрывается от

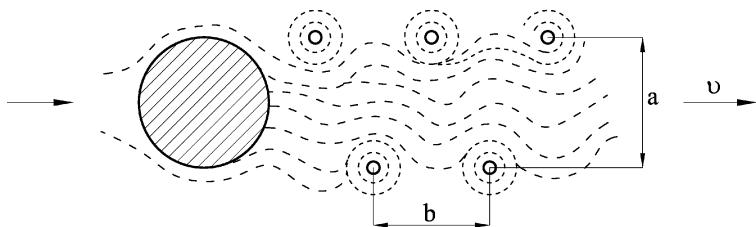


Рис. 2.39

Схема образования вихрей

тела и под влиянием пониженного давления за телом изменяет направление движения, образуя вихрь. Это происходит как в верхних, так и в нижних точках обтекаемого тела. Так как развитие вихря с одной стороны препятствует появлению вихря с другой стороны, то образование вихрей с той и другой стороны происходит поочередно. При этом за обтекаемым телом образуется вихревая дорожка Кармана шириной a , имеющая постоянное соотношение b/a , которое для обтекаемого цилиндра равно 0,281. Помимо цилиндрических, в вихревых расходомерах широкое применение нашли призматические тела обтекания прямоугольной, треугольной или трапециевидальной формы.

Принцип действия вихревого расходомера следующий. В потоке жидкости устанавливают чувствительный элемент, сигнализирующий о прохождении вихря через контрольную точку (рис. 2.40). Электронный блок прибора содержит счетчик вихрей, прошедших через контрольную точку за определенный промежуток времени, а также информацию о проходном сечении и плотности жидкости. Полученные от датчика сигналы усиливаются и преобразуются в электрические. Частота образующихся вихрей пропорциональна скорости движения и расходу жидкости.

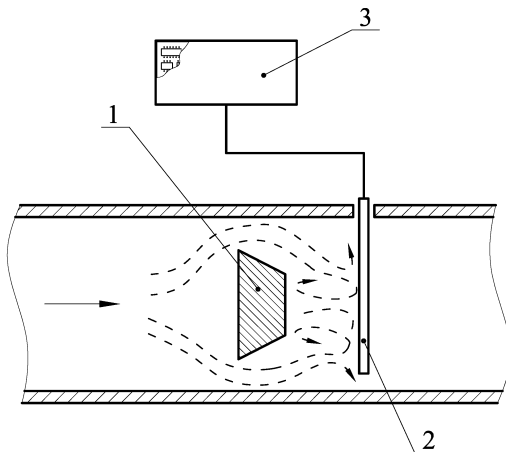


Рис. 2.40

Схема вихревого расходомера:

- 1 — обтекаемое тело; 2 — чувствительный элемент;
3 — преобразователь сигналов.

Вихревые расходомеры применяются для определения расходов жидкостей и газов при числах Рейнольдса от 20 000 до 7 000 000. В этом диапазоне коэффициент пропорциональности между частотой образования вихрей и скоростью потока практически не зависит от Re .

Если перед обтекаемым телом устанавливается сетка, создающая более или менее равномерное поле скоростей, то допустимо использование этого расходомера до $Re = 500$.

Тахометрические расходомеры и счетчики — приборы, имеющие подвижной, обычно вращающийся элемент, скорость движения которого пропорциональна объемному расходу. Прибор, измеряющий скорость движения подвижного элемента, называется расходомер, измеряющий общее число оборотов (или ходов) подвижного элемента — счетчик.

Тахометрические расходомеры и счетчики подразделяются на турбинные, крыльчатые, шариковые, роторно-шариковые, камерные (объемные).

Крыльчатый расходомер типа ВК (рис. 2.41) состоит из крыльчатки 1, закрепленной на трубчатой оси 3 и помещенной внутри корпуса 2, имеющего патрубки для входа и выхода жидкости. На корпусе установлена головка 5 с откидной крышкой 6. Крыльчатка через валик 4, муфту 9

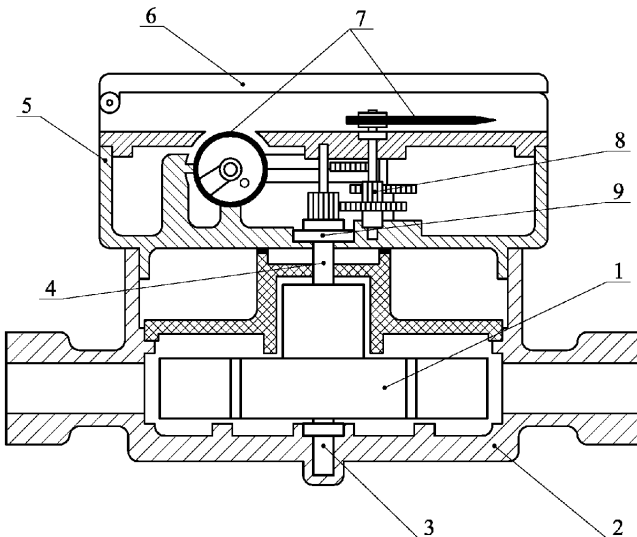


Рис. 2.41

Крыльчатый водомер

и передаточный механизм 8, связана со счетным механизмом 7, размещенным внутри головки. Передаточные и счетные механизмы представляют собой ряд шестерен, находящихся в зацеплении друг с другом. Шкала счетчика проградуирована в литрах или кубических метрах. Жидкость, протекающая через прибор, приводит во вращение крыльчатку, частота вращения которой пропорциональна скорости потока и, следовательно, расходу.

Этот тип расходомеров применяется достаточно давно, пригоден для измерения жидкостей любой вязкости, но чувствителен к загрязнениям и механическим примесям в жидкостях.

Электромагнитные расходомеры — приборы, в основе которых лежит взаимодействие движущейся электропроводной жидкости с магнитным полем, подчиняющееся закону электромагнитной индукции.

Расходомер состоит из первичного преобразователя (датчика) расхода и измерительного устройства.

Первичный преобразователь (рис. 2.42) представляет собой помещенный в кожух, изготовленный из немагнитного материала участок трубы 1, расположенный между двумя полюсами электромагнита 4. Магнитное поле направлено перпендикулярно к потоку жидкости. Участок трубы изнутри покрыт неэлектропроводной изоляцией. Электромагнит создает внутри трубы равномерное магнитное поле, которое пересекается жидкостью, движущейся через расходомер. При этом в жидкости, как в движущемся проводнике, индуцируется ЭДС, пропорциональная скорости и расходу протекающей жидкости. Для съема ЭДС в среднем сечении диаметрально противоположно друг другу помещены два электрода 2, находящиеся в контакте с жидкостью, но изолированные от трубы. Разность потенциалов E на электродах определяется уравнением

$$E = B \cdot D \cdot v = B \cdot \frac{4Q_0}{\pi D},$$

где B — магнитная индукция; D — расстояние между концами электродов, равное внутреннему диаметру трубопровода; v и Q_0 — средняя скорость и объемный расход протекающей жидкости.

Поступающий с электродов сигнал усиливается и преобразуется в электронном блоке 3 в электрический аналоговый или цифровой сигнал, отображаемый на дисплее самого прибора или транслируемый в контроллер или компьютер.

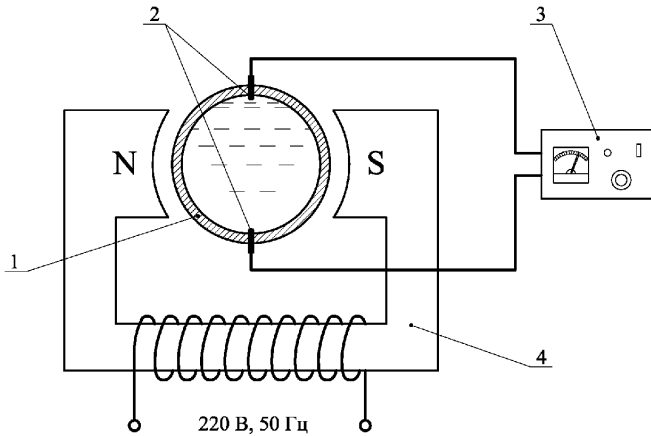


Рис. 2.42

*Принципиальная схема преобразователя расхода
электромагнитных расходомеров*

Электромагнитные расходомеры применяются для измерения расхода водопроводной воды, щелочи, кислоты и других жидкостей, применяемых в химической промышленности, сточных вод, крови в медицинской и физиологической практике, а также для измерения скорости морских течений и воды в открытых руслах.

Расходомеры неприменимы для измерения расходов газа и пара, а также жидкостей диэлектриков, таких как спирт и нефтепродукты.

Пригодны для измерения расхода жидкости, у которых удельная электрическая проводимость не менее 10^{-3} См/м.

Акустические (ультразвуковые) расходомеры — приборы, определяющие расход на основе измерения времени распространения импульсов ультразвукового колебания через движущуюся жидкость.

Возбуждение ультразвуковых колебаний осуществляется пьезоэлектрическими преобразователями 1 (рис. 2.43), установленными диаметрально противоположно друг другу под углом к оси трубопровода.

Участок трубопровода с пьезоэлектрическими преобразователями образует первичный ультразвуковой преобразователь расхода 2.

Движение жидкости в трубопроводе вызывает изменение скорости распространения ультразвуковых сигналов по ходу движения потока жидкости и против него. Скорость

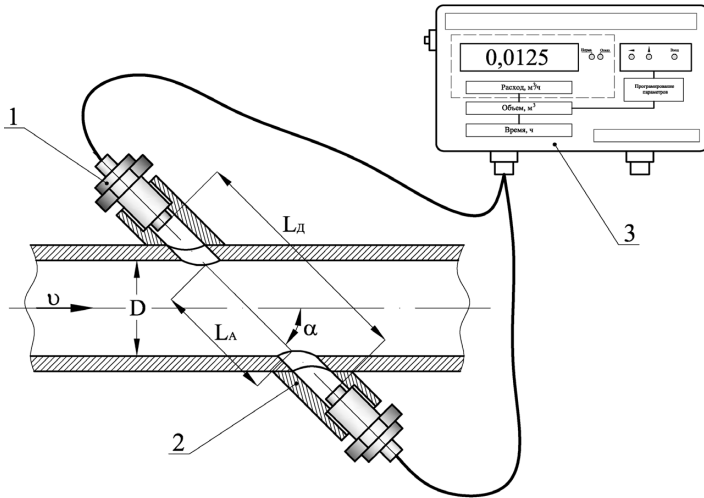


Рис. 2.43

Ультразвуковой расходомер

распространения ультразвукового импульса в жидкости, заполняющей трубопровод, определяется как сумма скоростей ультразвука в неподвижной жидкости и скорости потока жидкости v в проекции на рассматриваемое направление распространения ультразвука. Таким образом, разность между скоростью, а следовательно, и временем распространения ультразвуковых импульсов в прямом и обратном направлениях относительно движения жидкости пропорциональна скорости ее потока.

Время распространения ультразвука по ходу движения потока жидкости и против него определяется в соответствии с формулами:

$$t_1 = \frac{L_D - L_A}{C_0} + \frac{L_A}{C_0 + v \cdot \cos \alpha}; \quad (2.9)$$

$$t_2 = \frac{L_D - L_A}{C_0} + \frac{L_A}{C_0 - v \cdot \cos \alpha}, \quad (2.10)$$

где t_1, t_2 — время распространения ультразвукового импульса по потоку и против потока, с; L_A — длина активной части акустического канала, м; L_D — расстояние между

мембранами пьезоэлектрических преобразователей; C_0 — скорость ультразвука в неподвижной жидкости, м/с; v — скорость движения жидкости в трубопроводе, м/с; α — угол установки пьезоэлектрических преобразователей.

Устройство, содержащее электронные узлы формирования и преобразования ультразвуковых импульсов, вычисления расхода и его вывода на дисплей, образует вторичный преобразователь — электронный блок 3.

Вычисление расхода Q в электронном блоке осуществляется по формулам (2.11) и (2.12) с учетом формул (2.9) и (2.10):

$$v = \frac{(t_2 - t_1) \cdot C_0^2}{2L_A \cdot \cos \alpha}; \quad (2.11)$$

$$Q = K \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{(t_2 - t_1) \cdot C_0^2}{2L_A \cdot \cos \alpha}, \quad (2.12)$$

где D — внутренний диаметр преобразователя расхода в зоне установки пьезоэлектрических преобразователей, м; K — коэффициент коррекции, рассчитываемый в зависимости от гидродинамических свойств жидкости и характера ее потока в преобразователе расхода.

Для исключения влияния изменения скорости ультразвука в жидкости от температуры, в приборе учитывается фактическая скорость ультразвука, рассчитанная по формуле:

$$C_0^2 = \frac{L_D^2}{t_1 \cdot t_2}. \quad (2.13)$$

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Экспериментальная установка (рис. 2.44, 2.45) состоит из напорного трубопровода 1, соединенного с насосом 2 и питающим баком 3. На трубопроводе последовательно установлены: крыльчатый водосчетчик 4, электромагнитный расходомер 5, водомер-диафрагма 6 с пьезометрами № 12 и № 13 и ультразвуковой расходомер, состоящий из первичного ультразвукового преобразователя 7 и вторичного преобразователя — электронного блока 8. При работе с установкой используется секундомер.

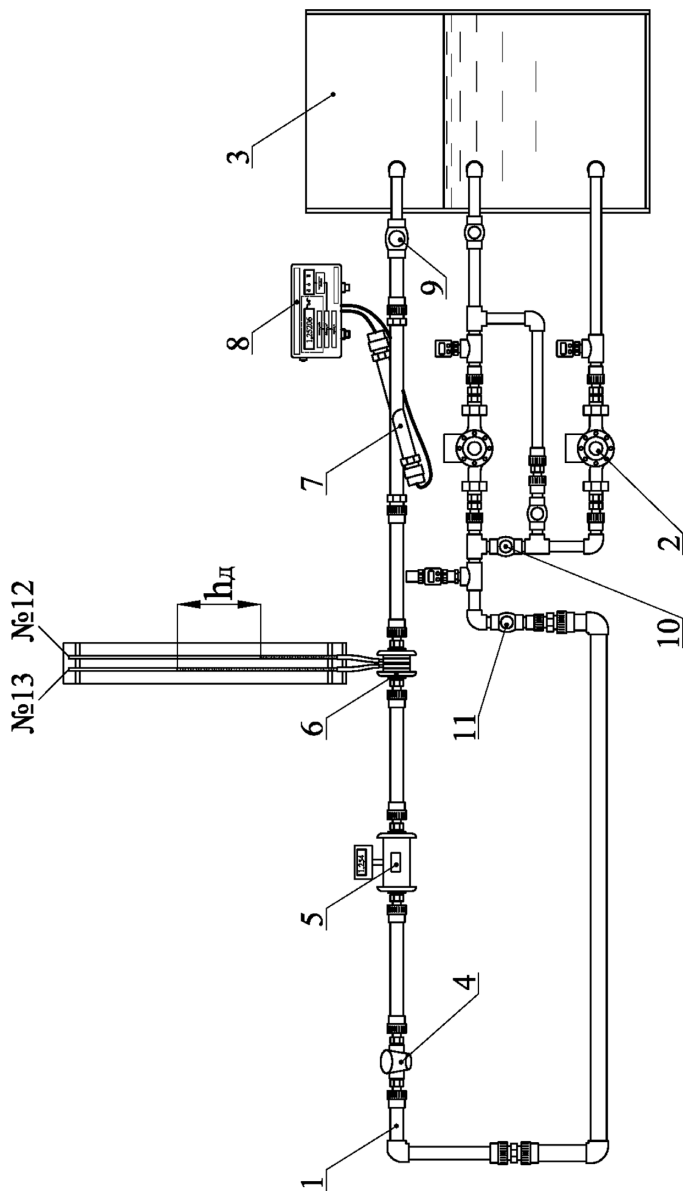


Рис. 2.44
Схема лабораторной установки



Рис. 2.45
Стенд для проведения лабораторной работы

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1. Заполнить бак 3 водой.
2. Открыть краны 9–11 и включить насос 3.
3. Измерить показания пьезометров № 12 и № 13 водомера-диафрагмы.
4. Снять показания с дисплея электромагнитного расходомера.
5. Снять показания с дисплея электронного блока ультразвукового расходомера.
6. Засечь по секундомеру время прохождения заданного объема жидкости через крыльчатый водосчетчик, зафиксировав по счетчику начало и конец отсчета.
7. Прикрыть наполовину кран 9 и повторить пункты 3–6.
8. Произвести обработку опытных данных.

ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

1. Определить постоянную водомера-диафрагмы:

$$A_d = \mu \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2g}{\alpha \left(\left(\frac{D}{d} \right)^4 - 1 \right)}},$$

где μ — коэффициент расхода диафрагмы; d — диаметр отверстия диафрагмы, см; D — диаметр трубопровода, см.

2. Определить разность показаний пьезометров диафрагмы:

$$H_d = \frac{p_1}{\gamma} - \frac{p_2}{\gamma},$$

где $\frac{p_1}{\gamma}$ — показание пьезометра № 13, см; $\frac{p_2}{\gamma}$ — показание пьезометра № 12, см.

3. Определить расход по водомеру-диафрагме:

$$Q_d = A_d \cdot \sqrt{H_d}.$$

4. Определить расход по крыльчатому водосчетчику:

$$Q_{\text{вод}} = W / t,$$

где W — объем воды по водосчетчику, см³; t — время опыта, с.

5. Определить относительную ошибку при измерении расходов диафрагмой, электромагнитным расходомером, ультразвуковым расходомером по отношению к крыльчатому водосчетчику.

6. Сделать выводы по работе.

Т а б л и ц а 2.9

Таблица опытных данных

Наименование показателя	Обозначение	Единица измерения	Опыт	
			1	2
1. Диаметр трубопровода	D	см		
2. Диаметр суженного сечения диафрагмы	d	см		
3. Коэффициент расхода диафрагмы	μ	—		
4. Постоянная водомера для диафрагмы	$A_d = \mu \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2g}{\alpha \left(\left(\frac{D}{d} \right)^4 - 1 \right)}}$	см ^{2,5} /с		
5. Показания пьезометров водомера-диафрагмы:				
№ 13	p_1/γ	см		
№ 12	p_2/γ	см		
6. Разность показаний пьезометров водомера-диафрагмы	$H_d = \frac{p_1}{\gamma} - \frac{p_2}{\gamma}$	см		
7. Объем воды по водосчетчику	W	л		
		см ³		
8. Время замера	t	с		
9. Расход, определенный по водосчетчику	$Q_{\text{вол}} = W/t$	см ³ /с		
10. Расход, определенный по водомеру-диафрагме	$Q_d = A_d \sqrt{H_d}$	см ³ /с		
11. Расход, определенный по электромагнитному расходомеру	$Q_{\text{эл. маг}}$	м ³ /ч		
		см ³ /с		

Продолжение табл. 2.9

Наименование показателя	Обозначение	Единица измерения	Опыт	
			1	2
12. Расход, определенный по ультразвуковому расходомеру	$Q_{ул}$	$\text{м}^3/\text{ч}$		
		$\text{см}^3/\text{с}$		
13. Относительная ошибка:				
водомер-диафрагма	δ_d	%		
электромагнитный расходомер	$\delta_{эл. маг}$			
ультразвуковой расходомер	$\delta_{ул}$			

Контрольные вопросы

1. Что такое расход жидкости и как его определить объемным способом?
2. Что такое объемный расход?
3. Что такое массовый расход?
4. Какие методы измерения расхода жидкости вы знаете?
5. Как классифицируются приборы для измерения расхода жидкости?
6. Что такое расходомер?
7. Что такое счетчик количества?
8. Что такое расходомер-счетчик?
9. Что такое преобразователь расхода?
10. Каковы принципы действия водомера Вентури, водомер-диафрагмы, вихревого расходомера, крыльчатого водосчетчика, электромагнитного расходомера, ультразвукового расходомера?

Лабораторная работа № 2.7

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УДАРА В НАПОРНОМ ТРУБОПРОВОДЕ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучить теоретические сведения по теме лабораторной работы.
2. Экспериментально определить величину повышения давления при гидравлическом ударе в случае мгновенного закрытия задвижки.
3. Сравнить экспериментальное и теоретическое значения повышения давления, определенное по формуле Н. Е. Жуковского, сделать выводы по работе.

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

Гидравлический удар — явление, связанное с резким изменением (повышением или понижением) давления в напорном трубопроводе при быстром изменении скорости движения жидкости в нем.

Гидравлический удар, начинающийся с волны повышения давления, называют *положительным*, а с волны пониженного давления — *отрицательным*.

К возникновению гидравлического удара могут привести мгновенное закрытие или открытие запорных устройств, выпуск воздуха через гидранты на оросительной сети при заполнении трубопровода водой (в заключительной стадии выпуска воздуха), внезапная остановка или пуск насоса и т. д. Изменение давления при гидравлическом ударе может во много раз превысить начальное давление в трубопроводе и привести к разрушению трубопровода и арматуры.

При внезапном (мгновенном) перекрытии трубопровода в остановившемся слое жидкости непосредственно у задвиж-

ки (клапана, крана и т. д.) повышается давление вследствие преобразования кинетической энергии остановившегося слоя жидкости в потенциальную энергию (энергию давления) жидкости. При этом жидкость сжимается, а сечение трубопровода расширяется.

По мере остановки последующих слоев жидкости увеличение давления будет распространяться по трубопроводу в сторону от задвижки, создавая волну повышенного давления, называемую *прямой ударной волной*.

После того как жидкость остановится по всей длине трубопровода до резервуара, давление в трубопроводе станет больше давления в резервуаре и жидкость придет в движение по направлению к резервуару, создавая волну пониженного давления в трубопроводе, называемую *обратной ударной волной*.

После прохождения обратной ударной волны давление в трубопроводе станет ниже, чем в резервуаре и начнется повторное движение жидкости по трубопроводу в сторону задвижки и повторный гидравлический удар, но с меньшим повышением давления вследствие потерь энергии потока на трение и деформацию трубопровода, фазы гидравлического удара будут повторяться до полного затухания.

Изменение давления в сечении у затвора представлено отрезками (рис. 2.46), отличающимися от первоначального давления p_0 попеременно на $+\Delta p$ и $-\Delta p$, причем чередование происходит через промежуток времени, который называется *фазой удара*.

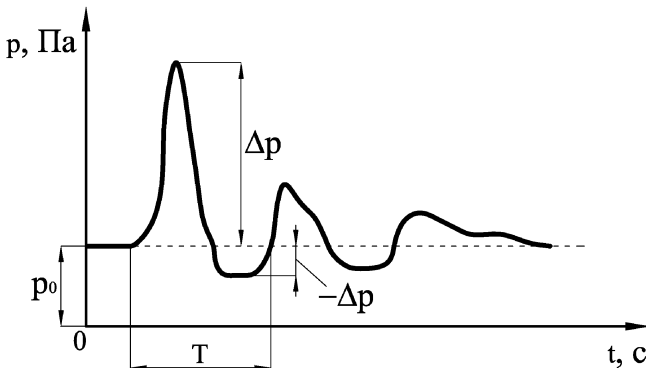


Рис. 2.46

Изменение давления в сечении у затвора
при гидравлическом ударе

Фаза гидравлического удара — время пробега прямой ударной волны (повышения давления от задвижки до резервуара) и обратной ударной волны (понижения давления от резервуара до задвижки), определяется по формуле:

$$T = \frac{2L}{C},$$

где T — фаза гидравлического удара, с; L — длина трубопровода, м; C — скорость распространения ударной волны, м/с.

Теория гидравлического удара разработана профессором Н. Е. Жуковским. При этом были получены, проверены и рекомендованы к практическому использованию формулы для определения величины повышения давления Δp при гидравлическом ударе и формулы для определения скорости C распространения ударной волны:

$$\Delta p = \rho \cdot C \cdot v, \quad (2.14)$$

где ρ — плотность жидкости, кг/м³; v — средняя скорость движения жидкости в трубопроводе до гидравлического удара, м/с.

Величина C определяется по формуле

$$C = \frac{\sqrt{\frac{E_0}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{E_0}{E} \cdot \frac{d}{\delta}}},$$

где E_0 и E — модули упругости, соответственно жидкости и материала трубопровода, Па; d — внутренний диаметр трубопровода, м; δ — толщина стенки трубопровода, м.

В зависимости от соотношения времени закрытия задвижки t_3 и фазы удара T различают *прямой* и *непрямой* гидравлический удар.

Прямой гидравлический удар может иметь место в трубопроводах весьма большой длины, когда $t_3 < T$. Максимальное повышение давления определяется по формуле Н. Е. Жуковского (2.14).

Непрямой гидравлический удар наблюдается когда $t_3 > T$. При этом максимальное повышение давления равно

$$\Delta p = \rho \cdot C \cdot v \cdot \frac{T}{t_3}.$$

В том случае, когда уменьшение скорости в трубе происходит не до нуля, а до некоторого значения $v_1 \neq 0$, возникает *неполный* гидравлический удар и формула Н. Е. Жуковского приобретает вид

$$\Delta p = \rho \cdot C \cdot (v - v_1).$$

Как отмечалось ранее, при гидравлическом ударе вследствие внезапного изменения давления трубопровод деформируется и может разрушиться. Разрушение будет происходить в том случае, когда нормальное напряжение в материале стенки трубопровода станет больше чем допустимое, т.е.

$$\sigma = \frac{\Delta p \cdot d}{2\delta} > [\sigma],$$

где σ — нормальное напряжение в материале стенки трубопровода, Па; $[\sigma]$ — допускаемое напряжение в материале, Па.

При проектировании гидросистем должны предусматриваться мероприятия по предотвращению опасных повышений и понижений давления в трубопроводе, а также меры по его защите от гидравлического удара. Основными мероприятиями по гашению гидравлического удара или его предотвращения являются: применение различного рода устройств, увеличивающих время закрытия задвижек и кранов; сброс части жидкости из системы автоматически действующими предохранительными клапанами, разрывными мембранами, через обводные линии (байпасы); использование воздушных колпаков, которые устанавливаются перед задвижками и играют роль воздушных буферов, воспринимающих повышение давления.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Установка (рис. 2.47, 2.48) включает бак 1, насос 2, длинный трубопровод 5, датчик давления 8 для замера повышения давления при гидроударе, пружинный манометр 9 для визуального контроля повышения давления, электромагнитный клапан 7 для быстрого перекрытия трубопровода, кнопка 6 управления клапаном, кран регулирования расхода воды 11, электромагнитный расходомер 10 и вспомогательные краны 3, 4.

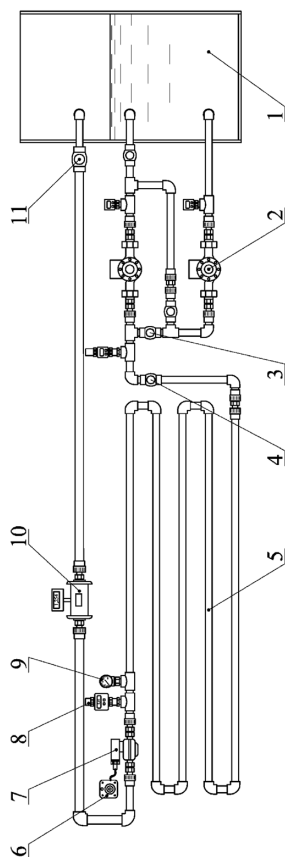
**Рис. 2.47**

Схема лабораторной установки

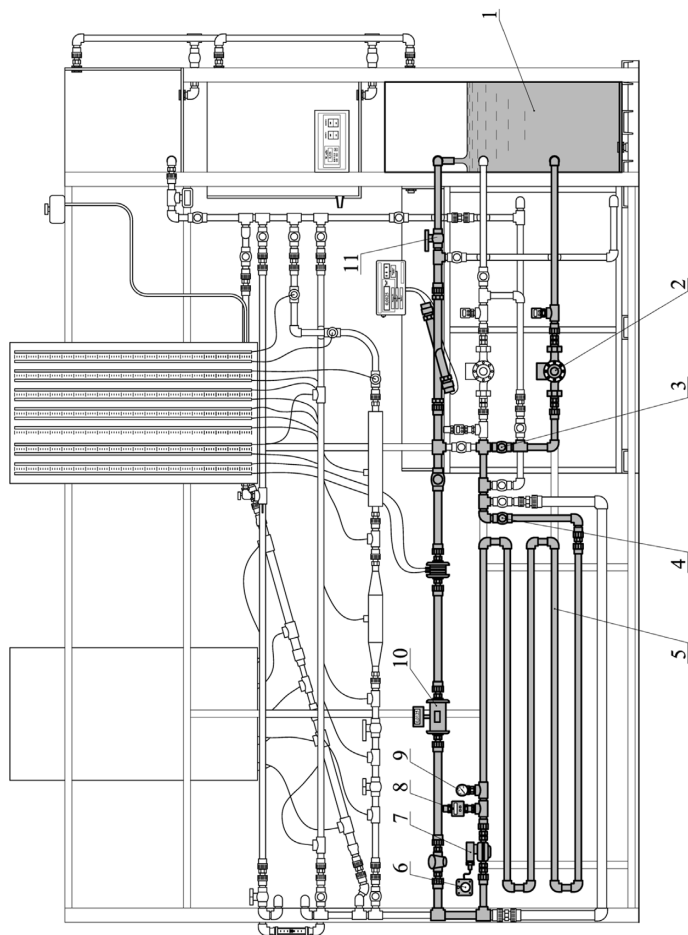


Рис. 2.48
Стенд для проведения лабораторной работы

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1. Заполнить бак 1 водой.
2. Включить насос 2.
3. Открыть краны 3, 4 и 11.
4. Измерить расход жидкости электромагнитным расходомером 10.
5. Измерить величину давления жидкости в трубопроводе (давление до гидроудара), используя датчик давления 8.
6. Нажать кнопку 6 управления электромагнитным клапаном 7, при этом клапан закроется и в напорном трубопроводе 5 возникнет гидравлический удар.
7. Посмотреть процесс изменения давления в трубопроводе по пружинному манометру 9.
8. Определить значение максимального давления в трубопроводе, используя датчик давления 8 (максимальное давление в трубопроводе фиксируется в памяти датчика).
9. Изменить расход жидкости краном 11 и повторить опыт (п. 4–8).
10. Произвести обработку опытных данных.

ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

1. Вычислить среднюю скорость воды в трубопроводе до гидравлического удара:

$$v = \frac{Q}{\omega}, \text{ м/с.}$$

2. Определить скорость распространения ударной волны по формуле:

$$C = \frac{\sqrt{\frac{E_0}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{E_0}{E} \cdot \frac{d}{\delta}}}, \text{ м/с.}$$

3. Рассчитать фазу гидравлического удара:

$$T = \frac{2L}{C}, \text{ с.}$$

4. Сравнить фазу гидравлического удара T с временем закрытия электромагнитного клапана t_3 и определить вид гидравлического удара – *прямой* или *непрямой*.

5. Рассчитать повышение давления при гидравлическом ударе по формуле Н. Е. Жуковского:

Прямой гидроудар ($t_3 < T$):

$$\Delta p_p = \rho \cdot C \cdot v, \text{ Па.}$$

Непрямой гидроудар ($t_3 > T$):

$$\Delta p_p = \rho \cdot C \cdot v \cdot \frac{T}{t_3}, \text{ Па.}$$

6. Сравнить опытное и расчетное значения Δp . Определить относительную ошибку.

7. Сделать выводы по работе.

Т а б л и ц а 2.10

Таблица опытных данных

Наименование показателя	Обозначение	Единица измерения	Опыт	
			1	2
1. Длина трубопровода	L	м		
2. Диаметр трубопровода	d	м		
3. Толщина стенок трубопровода	δ	м		
4. Модуль упругости материала трубопровода	E	Па		
5. Модуль упругости воды	E_0	Па		
6. Плотность воды	ρ	кг/м ³		
7. Расход воды в трубопроводе	Q	м ³ /ч		
		м ³ /с		
8. Площадь живого сечения трубопровода	$\omega = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$	м ²		
9. Средняя скорость движения воды до закрытия клапана	$v = \frac{Q}{\omega}$	м/с		
10. Скорость распространения волны гидроудара	$C = \frac{\sqrt{\frac{E_0}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{E_0}{E} \cdot \frac{d}{\delta}}}$	м/с		
11. Фаза гидравлического удара	$T = \frac{2L}{C}$	с		
12. Время закрытия клапана	t_3	с		

Продолжение табл. 2.10

Наименование показателя	Обозначение	Единица измерения	Опыт	
			1	2
13. Вид гидравлического удара	—	—		
14. Давление в трубопроводе до гидравлического удара	p_0	бар		
		МПа		
15. Максимальное давление в трубопроводе по датчику давления	$p_{\max}$	бар		
		МПа		
16. Повышение давления из опыта	$\Delta p_{\text{оп}} = p_{\max} - p_0$	МПа		
17. Повышение давления по формуле Н. Е. Жуковского	$\Delta p_p =$	МПа		
18. Относительная ошибка	δ	%		

Контрольные вопросы и задания

1. Дайте определение гидравлического удара.
2. Укажите причины возникновения гидравлического удара и его последствия.
3. Расскажите, как происходит гидроудар. Объясните понятия прямой и обратной ударной волны.
4. Как определить повышение давления при гидравлическом ударе?
5. Что такое фаза гидравлического удара. Как она определяется?
6. Как рассчитать скорость распространения ударной волны? От каких параметров она зависит?
7. В чем заключается прямой и непрямой гидравлический удар. Как рассчитать повышение давления при прямом и непрямом гидравлическом ударе?
8. Расскажите об условиях возникновения положительного и отрицательного гидроудара.
9. В каком случае возникает неполный гидравлический удар?
10. Расскажите о методах борьбы с гидравлическим ударом.

**ПРИМЕРЫ
ТЕСТОВЫХ ЗАДАНИЙ
ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ**

«ГИДРОДИНАМИКА»

КАРТОЧКА РУБЕЖНОГО КОНТРОЛЯ

ВАРИАНТ № 1

№ п/п	Вопросы	Ответы
1	Движение жидкости считается установившимся, если	$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial p}{\partial z}.$ $\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial u}{\partial z}.$ $\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial y} = 0; \frac{\partial p}{\partial z} \neq 0.$ $\frac{\partial u}{\partial x} \neq 0; \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial u}{\partial z} = 0.$ $\frac{\partial u}{\partial t} = 0.$
2	Расход жидкости, протекающей по трубе, равен 16,0 л/с. Чему будет равна площадь живого сечения потока, если средняя скорость потока 4 м/с?	25 см². 40 см². 4,0 см². 0,40 см². 2,5 см².
3	Площадь сечения в направлении движения струйки постоянно уменьшается. Как при этом изменяются полная удельная и удельная потенциальная энергии струйки?	- Не изменяются. - Уменьшаются. - Увеличиваются. - Полная удельная энергия уменьшается, а удельная потенциальная энергия увеличивается. - Полная удельная энергия увеличивается, а удельная потенциальная уменьшается.
4	Что такое гидравлический радиус? Это	- Радиус трубопровода. - Смоченный периметр, умноженный на площадь живого сечения. - Отношение площади живого сечения к смоченному периметру.

Продолжение табл.

№ п/п	Вопросы	Ответы
4	Что такое гидравлический радиус? Это	4. Отношение смоченного периметра к площади живого сечения. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
5	Уравнение Бернулли для безнапорного равномерного потока имеет вид	1. $\frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha v_2^2}{2g} + h_w$. 2. $z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{u_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{u_2^2}{2g}$. 3. $z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha v_2^2}{2g} + h_w$. 4. $z_1 = z_2 + h_\ell$. 5. $\frac{p_1}{\gamma} = \frac{p_2}{\gamma} + h_w$.
6	При турбулентном движении местные потери напора в напорной трубе равны 9,0 м. Чему будут равны эти потери, если расход увеличится в три раза?	1. 3,0 м. 2. 27,0 м. 3. 1,0 м. 4. 81,0 м. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
7	Укажите формулу Шези. В каких случаях она применяется?	1. $v = c \cdot \sqrt{RI}$, применяется при полностью развитом турбулентном режиме в квадратичной зоне сопротивления. 2. $h_\ell = \frac{32 \cdot v \cdot l \cdot v}{gd^2}$, применяется при ламинарном режиме. 3. $h_\ell = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}$, применяется во всех случаях. 4. $h_{\text{мп}} = \xi \cdot \frac{v^2}{2g}$, применяется при ламинарном режиме. 5. $h_\ell = \lambda \cdot \frac{l}{4R} \cdot \frac{v^2}{2g}$, применяется только в зоне гидравлически гладких труб.

Продолжение табл.

№ п/п	Вопросы	Ответы
8	Движение жидкости в круглых трубах происходит в квадратичной зоне. Как изменятся потери напора по длине, если расход жидкости увеличится в два раза?	1. Увеличится в два раза. 2. Уменьшится в два раза. 3. Не изменится. 4. Увеличится в четыре раза. 5. Уменьшится в четыре раза.
9	Зависит ли повышение давления при непрямом гидравлическом ударе в трубопроводе от времени перекрытия трубопровода $t_{\text{зак}}$?	1. Не зависит. 2. Чем больше $t_{\text{зак}}$, тем больше повышение давления. 3. Чем больше $t_{\text{зак}}$, тем меньше повышение давления. 4. Увеличение $t_{\text{зак}}$ вызывает квадратичное увеличение повышения давления. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
10	Истечение жидкости из резервуара в атмосферу происходит через гидравлический насадок при напоре 5,0 м. Расход истечения равен 5 л/с. Как изменится расход, если напор уменьшится в два раза?	1. Останется неизменным. 2. Уменьшится в два раза. 3. Увеличится в два раза. 4. Уменьшится в $\sqrt{2}$ раз. 5. Увеличится в $\sqrt{2}$ раз.

ВАРИАНТ № 2

№ п/п	Вопросы	Ответы
1	В установившемся и неустановившемся движениях жидкости с течением времени очертания линий тока	1. Изменяются. 2. Не изменяются. 3. В установившемся движении изменяются; в неустановившемся движении не изменяются. 4. В установившемся движении не изменяются; в неустановившемся движении изменяются. 5. Очертания линий тока не зависят от режима движения жидкости.
2	Как изменяются расход и средняя скорость установившегося потока жидкости, если в направлении движения живое сечение потока уменьшается?	1. Расход увеличивается, средняя скорость уменьшается. 2. Расход постоянен, средняя скорость уменьшается. 3. Расход постоянен, средняя скорость увеличивается. 4. Увеличиваются. 5. Уменьшаются.
3	Гидродинамический напор потока, это	1. $H = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{u^2}{2g}$. 2. $H = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{u^2}{2g} + h_l$. 3. $H = z + \frac{p}{\gamma}$. 4. $H = z + p + \frac{u^2}{2g}$. 5. $H = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{\alpha v^2}{2g}$.
4	Что такое напорное движение потока? Это	1. Движение жидкости, когда поток имеет свободную поверхность. 2. Движение жидкости, когда поток не имеет свободную поверхность.

Продолжение табл.

№ п/п	Вопросы	Ответы
4	Что такое напорное движение потока? Это	3. Такой вид движения, при котором все гидравлические параметры движения не изменяются по длине. 4. Движение жидкости по трубе. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
5	Уравнение Бернулли для элементарной струйки идеальной жидкости имеет вид	1. $\frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha v_2^2}{2g} + h_w$. 2. $z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{u_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{u_2^2}{2g} + h_\ell$. 3. $z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha v_2^2}{2g} + h_w$. 4. $z_1 + \frac{\alpha v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{\alpha v_2^2}{2g} + h_\ell$. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
6	Местные потери напора в напорной трубе при турбулентном движении равны 16,0 м. Чему будут равны эти потери, если расход уменьшится в четыре раза?	1. 32,0 м. 2. 16,0 м. 3. 64,0 м. 4. 48,0 м. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
7	Коэффициент Дарси λ в зоне ламинарного режима движения определяется как	1. $\lambda = \frac{0,316}{\sqrt[4]{\text{Re}}}$. 2. $\lambda = \frac{64}{\text{Re}}$. 3. $\lambda = 0,11 \cdot \left(\Delta_r + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25}$. 4. $\lambda = 0,11 \cdot (\Delta_r)^{0,25}$. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
8	Потери напора по длине в трубопроводе диаметром $d = 100$ мм составляют 0,1 м.	1. Увеличатся в три раза. 2. Уменьшатся в три раза. 3. Не изменятся.

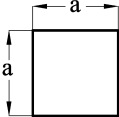
Продолжение табл.

№ п/п	Вопросы	Ответы
8	Первоначальный расход равнялся 0,05 л/с. Как изменятся потери по длине при уменьшении расхода в три раза, если кинематическая вязкость жидкости 0,02 см ² /с?	4. Увеличатся в 1,75 раза. 5. Уменьшатся в 1,75 раза.
9	Повышение давления при прямом гидравлическом ударе в трубопроводе определяется по формуле Н. Е. Жуковского:	1. $\Delta p = \rho \cdot C \cdot v \cdot \frac{T}{t_{\text{зак}}}$. 2. $\Delta p = \rho \cdot C \cdot v$. 3. $p = p_0 + \gamma \cdot h$. 4. $P = p_c \cdot F$. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
10	Истечение жидкости из резервуара в атмосферу происходит через гидравлический насадок при напоре 4,0 м. Расход истечения равен 4 л/с. Чему будет равен расход, если напор увеличится до 8 м?	1. 4,0 л/с. 2. 5,6 л/с. 3. 1,75 л/с. 4. 2,85 л/с. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.

ВАРИАНТ № 3

№ п/п	Вопросы	Ответы
1	Пересекаются ли траектории движения частиц жидкости в установившемся и не установившемся движениях?	1. В установившемся движении не пересекаются; в не установившемся движении пересекаются. 2. Не пересекаются. 3. Пересекаются. 4. Траектории движения частиц жидкости не зависят от режима движения жидкости. 5. В установившемся движении пересекаются; в не установившемся движении не пересекаются.
2	В трубе переменного сечения наблюдается установившееся движение. Как изменяются расход и средняя скорость потока жидкости, если в направлении движения живое сечение потока увеличивается?	1. Расход постоянен, средняя скорость увеличивается. 2. Расход постоянен, средняя скорость уменьшается. 3. Расход и средняя скорость постоянны. 4. Увеличиваются. 5. Уменьшаются.
3	$H = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{\alpha v^2}{2g}$ это	1. Гидродинамический напор потока; 2. Гидростатический напор потока; 3. Скоростной напор потока; 4. Пьезометрический напор потока; 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
4	Труба имеет квадратное сечение со стороной квадрата $a = 10$ см,	1. 0,025 м; 2. 0,010 м; 3. 0,004 м;

Продолжение табл.

№ п/п	Вопросы	Ответы
4	движение напорное. Чему будет равен гидравлический радиус? 	4. 2,5 м. 5. 0,1 м.
5	Уравнение Бернулли для напорного потока имеет вид	1. $z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{u_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{u_2^2}{2g}$. 2. $z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{u_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{u_2^2}{2g} + h_\ell$. 3. $z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha v_2^2}{2g} + h_w$. 4. $z_1 + \frac{\alpha v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{\alpha v_2^2}{2g} + h_w$. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
6	Местные потери напора в напорной трубе при турбулентном движении равны 3,0 м. Чему будут равны эти потери, если расход увеличится в четыре раза?	1. Увеличатся в четыре раза. 2. Уменьшатся в четыре раза. 3. Не изменятся. 4. Увеличатся в шестнадцать раз. 5. Уменьшатся в шестнадцать раз.
7	Коэффициент Дарси λ в переходной зоне определяется как	1. $\lambda = \frac{0,316}{\sqrt[4]{\text{Re}}}$. 2. $\lambda = \frac{64}{\text{Re}}$. 3. $\lambda = 0,11 \cdot (\Delta_r)^{0,25}$. 4. $\lambda = 0,11 \cdot \left(\Delta_r + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25}$. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.

Продолжение табл.

№ п/п	Вопросы	Ответы
8	Потери напора по длине в трубопроводе диаметром $d = 100$ мм составляют 12 см. Первоначальный расход равнялся 0,025 л/с. Как изменятся потери по длине при уменьшении расхода в три раза, если кинематическая вязкость жидкости 0,02 см ² /с?	1. $h_\ell = 0,04$ м. 2. $h_\ell = 0,01$ м. 3. $h_\ell = 0,2$ м. 4. $h_\ell = 0,08$ м. 5. $h_\ell = 1,2$ м.
9	Если при гидравлическом ударе в трубопроводе давление резко повышается, то такой гидравлический удар называют	1. Прямой гидравлический удар. 2. Непрямой гидравлический удар. 3. Положительный гидравлический удар. 4. Отрицательный гидравлический удар. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
10	Истечение жидкости из резервуара в атмосферу происходит через малое отверстие в тонкой стенке при постоянном напоре истечения. Изменится ли расход истечения, если отверстие увеличится в два раза?	1. Останется неизменным. 2. Уменьшится в два раза. 3. Увеличится в два раза. 4. Уменьшится в $\sqrt{2}$ раз. 5. Увеличится в $\sqrt{2}$ раз.

Часть 3

**ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ
МАШИНЫ**

Лабораторная работа № 3.1

ИСПЫТАНИЕ ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучить теоретические сведения по теме лабораторной работы.
2. Выявить зависимости напора H , мощности N и КПД η насоса от расхода Q при постоянной частоте вращения рабочего колеса $n = \text{const}$.
3. Построить рабочие характеристики насоса по опытными данным, сделать выводы по работе.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

Насосы — гидравлические машины, служащие для всасывания и нагнетания разнообразных жидкостей по напорным трубам.

Насосы разделяются на две основные группы: динамические и объемные.

Динамический насос — насос, в котором жидкая среда перемещается под силовым воздействием на нее в камере, постоянно сообщаемой со входом и выходом насоса. К ним относят лопастные, трения и инерции, электромагнитные насосы.

Объемный насос — насос, в котором жидкая среда перемещается путем периодического изменения объема занимаемой ею камеры, попеременно сообщаемой со входом и выходом насоса. К ним относятся возвратно-поступательные, роторные и возвратно-поворотные насосы.

Основными параметрами, характеризующими работу насосов всех типов, являются: напор, производительность, мощность и коэффициент полезного действия (КПД).

Напор насоса — удельная энергия, сообщаемая насосом жидкости.

При проектировании насосной установки по заданным условиям напор насоса определяется по формуле:

$$H = H_{\Gamma} + h_w + \frac{p_d - p_0}{\gamma},$$

где H_{Γ} — высота подъема (высота подачи или геометрический напор), м; h_w — суммарные потери напора во всасывающем и нагнетательном трубопроводах, м; p_0, p_d — давления на свободных поверхностях жидкости в источнике и приемнике соответственно, Па; γ — удельный вес перекачиваемой жидкости, Н/м³.

Эта формула называется *проектной формулой напора насоса*. Если на свободной поверхности источника и приемника жидкости действует атмосферное давление, то $p_d = p_0 = p_{\text{атм}}$, и проектная формула напора насоса принимает вид:

$$H = H_{\Gamma} + h_w.$$

Для определения напора насоса на действующей установке используется *эксплуатационная формула напора*:

$$H = \frac{p_{\text{м}} \pm p_{\text{мв}}}{\gamma} + z + z_{\text{м}},$$

где $p_{\text{м}}$ — показание манометра, установленного на нагнетательном патрубке, Па; $p_{\text{мв}}$ — показание мановакуумметра, установленного на всасывающем патрубке, Па; z — вертикальное расстояние между нагнетательным и всасывающим патрубками насоса, м; $z_{\text{м}}$ — расстояние по вертикали от манометра до точки его подсоединения, м.

Если во всасывающей трубе давление выше атмосферного (избыточное давление), то в формуле перед $p_{\text{мв}}$ ставят знак «−» (минус), если ниже атмосферного (вакуум), то ставят знак «+» (плюс).

Если сумма $z + z_{\text{м}}$ мала, то напор с достаточной точностью определяется по упрощенной формуле:

$$H = \frac{p_{\text{м}} \pm p_{\text{мв}}}{\gamma},$$

т. е. по сумме показаний манометра и мановакуумметра. При весьма большом напоре (порядка ста и более метров) достаточно точное выражение его величины дает просто показание манометра, выраженное в метрах столба перекачиваемой жидкости, т. е. в этом случае $H \cong \frac{p_{\text{м}}}{\gamma}$.

Производительностью (подачей, расходом) Q насоса называется объем жидкости, подаваемый насосом в единицу времени. В системе СИ расход измеряется в м³/с. На практике, если величина расхода незначительна, то его удобнее измерять в м³/ч, л/мин или л/с.

Мощностью насоса N называется мощность на его валу (потребляемая мощность). *Полезной мощностью $N_{\text{п}}$* называют количество энергии, сообщаемое насосом в единицу времени жидкости, подаваемой им в нагнетательный трубопровод.

В единицу времени насос пропускает количество жидкости, вес которой равен Q (весовой расход жидкости), где γ — удельный вес жидкости. Следовательно, полезная мощность равна

$$N_{\text{п}} = \gamma \cdot Q \cdot H,$$

где $N_{\text{п}}$ — полезная мощность, Вт; γ — удельный вес, Н/м³; Q — расход, м³/с; H — напор насоса, м.

Мощность, потребляемая насосом, определяется по формуле:

$$N = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{\eta},$$

где η — КПД насоса.

Мощность, потребляемая двигателем, приводящим насос в действие, рассчитывается по формуле:

$$N_{\text{дв}} = \frac{N}{\eta_{\text{п}}} \cdot K = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{\eta \cdot \eta_{\text{п}}} \cdot K,$$

где K — коэффициент запаса ($K = 1,05-1,3$); $\eta_{\text{п}}$ — КПД передачи. При отсутствии передачи, т. е. при непосредственном соединении валов насоса и двигателя, подставляется $\eta_{\text{п}} = 1$.

Коэффициент полезного действия насоса — отношение полезной мощности к мощности на валу насоса:

$$\eta = \frac{N_{\text{п}}}{N}.$$

При работе насоса часть подводимой к нему мощности теряется (превращается в тепло). Эти потери мощности делятся на механические, объемные и гидравлические, которые учитываются соответственно механическим, объемным и гидравлическим КПД.

Механический η_m , объемный η_v и гидравлический η_H коэффициенты полезного действия называют частными КПД насоса. Они связаны с полным КПД насоса следующим выражением:

$$\eta = \eta_m \cdot \eta_v \cdot \eta_H.$$

Оптимальный режим насоса — режим работы насоса при наибольшем значении КПД.

Номинальный режим насоса — режим работы насоса, обеспечивающий заданные технические показатели.

Характеристикой центробежного насоса называется графическое изображение зависимости напора H , потребляемой мощности N и коэффициента полезного действия η насоса от подачи Q при постоянной частоте вращения.

Все рабочие характеристики центробежного насоса наносят на общий график, по оси абсцисс откладывая расходы насоса Q , по оси ординат значения H , N и η (рис. 3.1). Практически эти характеристики строят на основании испытаний насоса при различной степени открытия задвижки на напорном трубопроводе. Кривые строят минимум по 5–6 точкам, т. е. при 5–6 расходах (включая $Q = 0$).

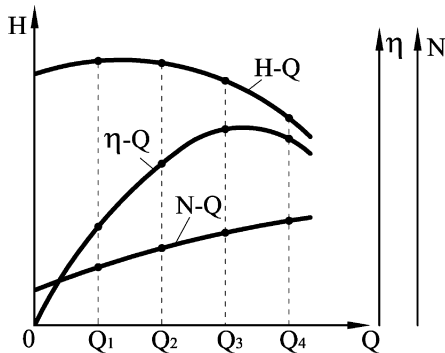


Рис. 3.1

Характеристика центробежного насоса

Характеристика $H-Q$. Графическая зависимость между развиваемым напором H и подачей Q при постоянном числе оборотов, называется рабочей характеристикой насоса $H-Q$ (рис. 3.2).

Теоретическая характеристика насоса H_T-Q с учетом конечного числа лопаток графически представляет собой прямую линию, которая понижается с увеличением расхода.

При течении реальной жидкости в насосе часть энергии расходуется на преодоление гидравлических сопротивлений: на трение в каналах между рабочими лопатками и в спиральной камере, а также на удар жидкости о лопатки рабочего колеса при входе и выходе с него. С учетом всех этих потерь характеристика представляет собой кривую $H-Q$ (рис. 3.2).

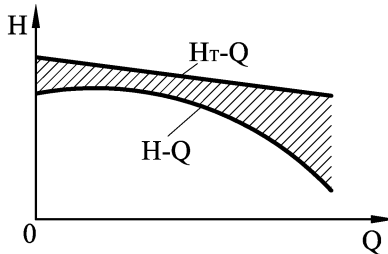


Рис. 3.2

Характеристика $H-Q$

Характеристика $N-Q$. Это кривая зависимости мощности насоса от производительности при постоянном числе оборотов (рис. 3.3). Характеристика $N-Q$ обычно имеет вид слабо искривленной линии, причем с увеличением расхода мощность увеличивается. При нулевом расходе $N = N_0$.

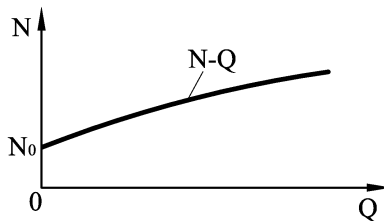


Рис. 3.3

Характеристика $N-Q$

Нулевой расход насоса получается, когда задвижка на нагнетательном патрубке полностью перекрыта. При этом мощность насоса (т. е. мощность на его валу) не равна нулю, так как насос затрачивает энергию, получаемую им от электродвигателя, на перемешивание и нагревание жидкости внутри корпуса насоса, без подачи ее в нагнетательный трубопровод. Однако при нулевой подаче мощность все же минимальна. Поэтому центробежный насос пускают в ход при закрытой задвижке. При этом пусковая мощность и пуско-

вой момент минимальны. Это особенно важно при использовании широко применяемых электродвигателей переменного тока с короткозамкнутым ротором. Если применяемый двигатель имеет большой запас мощности, пуск насоса возможен и при открытой задвижке.

Характеристика η - Q . Кривая η - Q представлена на рисунке 3.4. При нулевом расходе, т. е. при закрытой задвижке, КПД равен нулю, вследствие равенства нулю полезной мощности. При некотором (оптимальном) расходе КПД получает максимальное значение и при дальнейшем увеличении производительности насоса несколько снижается.

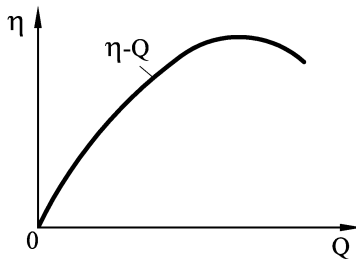


Рис. 3.4
Характеристика η - Q

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Установка для испытания центробежных насосов (рис. 3.5) представляет собой рамную конструкцию, на которой смонтированы: два центробежных насоса, пульт управления, система трубопроводов с запорной арматурой и напорный бак. Для измерения подачи и определения напора в систему трубопроводов встроены расходомер и датчики давления.

На панели пульта управления размещены клавиши включения-отключения установки и насосов; дисплей ваттметра и расходомера.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1. Произвести внешний осмотр установки и убедиться в отсутствии видимых повреждений.
2. Залить воду в бак и заполнить насосы водой.

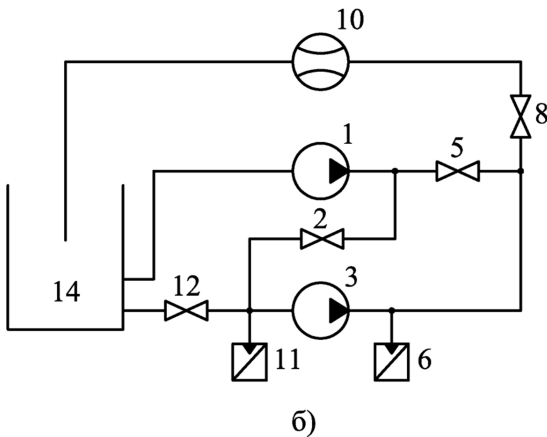
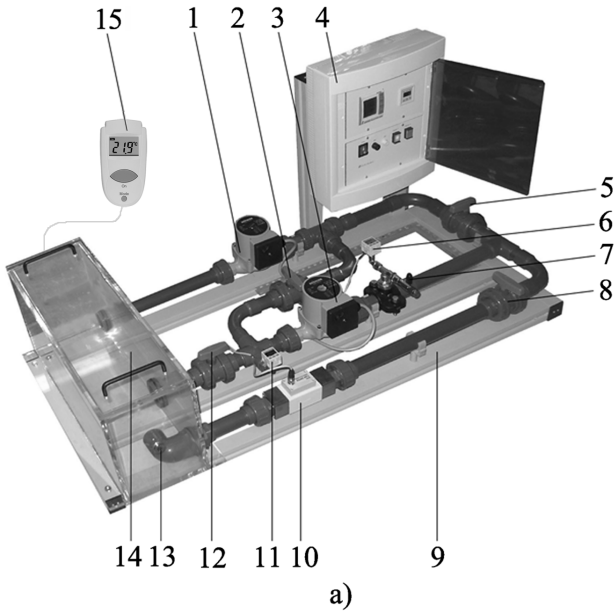


Рис. 3.5

Установка для испытания центробежных насосов:

а — внешний вид установки; б — гидравлическая схема установки: 1, 3 — насосы; 2, 5, 8, 12 — вентили; 4 — пульт управления; 6 — датчик давления (манометр); 9 — рама; 10 — расходомер; 11 — датчик давления (мановакуумметр); 13 — трубопровод; 14 — напорный бак; 15 — термометр.

3. Открыть вентиль 12 и закрыть вентили 2, 5, 8 (рис. 3.5б).

4. Включить установку в сеть и запустить насос 3.

5. При закрытом вентиле 8 снять показания мановакуумметра $p_{\text{мв}}$, манометра $p_{\text{м}}$, ваттметра $N_{\text{э}}$ (мощность на клеммах электродвигателя) и расходомера Q .

6. Частично открыть вентиль 8 и снять показания мановакуумметра $p_{\text{мв}}$, манометра $p_{\text{м}}$, ваттметра $N_{\text{э}}$ и расходомера Q .

7. Повторить опыт (п. 6), увеличивая степень открытия вентилей 8 до полного его открытия (7–8 раз).

8. Закрыть вентиль 8 и выключить насос, отключить установку от сети.

ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

1. Рассчитать напор насоса по формуле

$$H = \frac{p_{\text{м}} \pm p_{\text{мв}}}{\gamma}.$$

2. Определить полезную мощность:

$$N_{\text{п}} = \gamma Q H.$$

3. Вычислить мощность на валу насоса по формуле

$$N = N_{\text{э}} \eta_{\text{э}}.$$

4. Рассчитать коэффициент полезного действия насоса:

$$\eta = \frac{N_{\text{п}}}{N} 100\%.$$

5. Построить на основе опытных данных характеристики насоса $H-Q$, $N-Q$ и $\eta-Q$.

6. Сделать выводы по работе.

Т а б л и ц а 3.1

Таблица опытных данных

Наименование показателя	Обозначение	Единица измерения	Опыты							
			1	2	3	4	5	6	7	8
1. Давление по мановакуумметру	$p_{\text{мв}}$	Па								
2. Давление по манометру	$p_{\text{м}}$	Па								
3. Напор насоса	$H = \frac{p_{\text{м}} \pm p_{\text{мв}}}{\gamma}$	м								

Продолжение табл. 3.1

Наименование показателя	Обозначение	Единица измерения	Опыты							
			1	2	3	4	5	6	7	8
4. Подача насоса	Q	$\text{м}^3/\text{с}$								
5. Полезная мощность	$N_{\text{п}} = \gamma Q H$	Вт								
6. Мощность на клеммах электродвигателя	$N_{\text{э}}$	Вт								
7. КПД электродвигателя	$\eta_{\text{э}}$	—								
8. Мощность на валу насоса	$N = N_{\text{э}} \eta_{\text{э}}$	Вт								
9. КПД насоса	$\eta = \frac{N_{\text{п}}}{N} 100\%$	%								

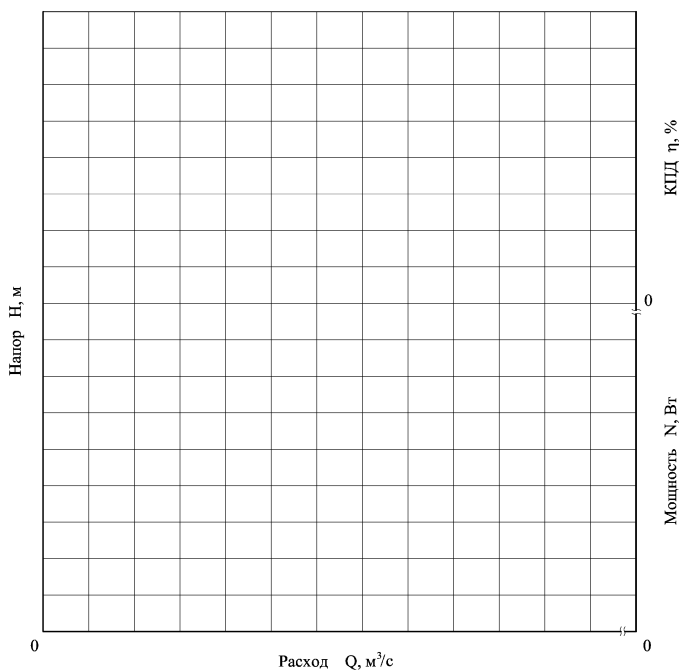


Рис. 3.6

Рабочие характеристики центробежного насоса

Контрольные вопросы и задания

1. Как классифицируются насосы? Чем отличаются динамические насосы от объемных?
2. Приведите основные показатели работы насосов.
3. Назначение проектной формулы напора насоса.
4. Назначение эксплуатационной формулы напора насоса.
5. Каковы условия запуска центробежного насоса?
6. Что такое рабочая характеристика насоса?
7. Каким образом происходит построение рабочей характеристики насоса?
8. Расскажите о характеристиках $H-Q$, $N-Q$ и $\eta-Q$.
9. Что такое напор насоса и как его определить по показаниям приборов?
10. Что такое мощность насоса и полезная мощность?

Лабораторно-практическая работа № 3.2

ПОСТРОЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРУБОПРОВОДА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучить теоретические сведения по теме лабораторно-практической работы.
2. Построить характеристику трубопровода, найти координаты рабочей точки.
3. Определить параметры работы насоса на данный трубопровод, сделать выводы по работе.

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

Потребный напор любого насоса определяется по проектной формуле

$$H = H_{\Gamma} + h_w + \frac{p_d - p_0}{\gamma}.$$

Если в этой формуле обозначить величину

$$H_{\Gamma} + \frac{p_d - p_0}{\gamma} = h_{\text{ст}},$$

тогда

$$H = h_{\text{ст}} + h_w, \quad (3.1)$$

где $h_{\text{ст}}$ — статический напор насосной установки, м; h_w — суммарные потери напора, м.

$$h_w = h_l + h_m = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} + \sum \xi \frac{v^2}{2g}.$$

В общем случае суммарные потери напора h_w определяются по формуле

$$h_w = \left(\lambda \frac{l}{d} + \sum \xi \right) \frac{v^2}{2g}.$$

Пренебрегая разницей в диаметрах напорного и всасывающего трубопроводов и выразив скорость через расход получим

$$h_w = \frac{\lambda \frac{l}{d} + \sum \xi}{2g \cdot \omega^2} \cdot Q^2.$$

Для развитого турбулентного режима коэффициенты λ и $\sum \xi$ можно считать величинами постоянными, поэтому

$$\frac{\lambda \frac{l}{d} + \sum \xi}{2g \cdot \omega^2} = k,$$

где k — сопротивление трубопроводов насосной установки.

С учетом вышеизложенного формула (3.1) примет вид:

$$H = h_{\text{ст}} + k \cdot Q^2. \quad (3.2)$$

Для данной насосной установки статический напор $h_{\text{ст}}$ является величиной постоянной. Поэтому зависимость (3.2)

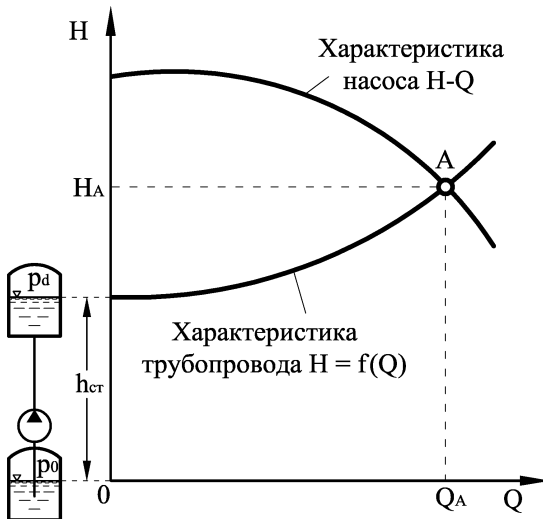


Рис. 3.7

Работа насоса на данный трубопровод

является параболической и может быть построена в координатах $H-Q$ (рис. 3.7). Полученная кривая $H = f(Q)$ носит название *характеристики трубопровода*.

Эта характеристика показывает зависимость напора, который надо сообщить жидкости, поступающей в трубопровод, от расхода, подаваемого по трубопроводу.

Построив характеристики центробежного насоса и трубопровода в общей системе координат (рис. 3.7) получим точку их пересечения (А), называемую *рабочей точкой*. Рабочая точка соответствует рабочему режиму насоса в данной системе, т. е. данный центробежный насос подавая жидкость с напором H_A в данный трубопровод обеспечит подачу Q_A .

ПРИМЕР ПОСТРОЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРУБОПРОВОДА

Задание. Построить характеристику трубопровода диаметром $d = 45$ мм и длиной $l = 9$ м, если коэффициент гидравлического трения $\lambda = 0,026$, местные сопротивления составляют 15% от потерь по длине и статический напор, преодолеваемый насосом, составляет $h_{ст} = 20$ м.

Определить подачу насоса К45/30 (диаметр рабочего колеса 168 мм) при работе на данный трубопровод, развиваемый им напор, мощность на валу насоса, его КПД и допустимый кавитационный запас.

Определить, какая часть напора H_3 будет затрачена на преодоление сопротивлений, создаваемых задвижкой при изменении подачи насоса до $Q = 30$ м³/ч и мощность N_3 , теряемую при этом на задвижке.

Р е ш е н и е. Для построения характеристики трубопровода необходимо выполнить следующее.

1. Вычислить данные для построения характеристики трубопровода.

Характеристика трубопровода для заданных условий определяется следующим выражением

$$\begin{aligned} H &= h_{ст} + h_w = h_{ст} + 1,15 \cdot \frac{\lambda \cdot l}{2g \cdot \omega^2} \cdot Q^2 = \\ &= h_{ст} + 1,15 \cdot \frac{\lambda \cdot l}{2g \cdot d \cdot \left(\frac{\pi d^2}{4}\right)^2} \cdot Q^2 = h_{ст} + 1,15 \cdot \frac{8 \cdot \lambda \cdot l}{g \cdot \pi^2 \cdot d^5} \cdot Q^2. \end{aligned}$$

Следовательно, уравнение характеристики трубопровода имеет вид

$$H = 20 + 1,15 \cdot \frac{8 \cdot 0,026 \cdot 9}{9,81 \cdot 3,14^2 \cdot 0,045^5} \cdot Q^2 = 20 + 120\,618 \cdot Q^2.$$

2. Построить характеристику трубопровода (рис. 3.8) по точкам, для которых рассчитаны значения напора H в зависимости от подачи Q (при подстановке значений подачи в уравнение необходимо перевести Q из $\text{м}^3/\text{ч}$ в $\text{м}^3/\text{с}$, разделив на 3600) (табл. 3.2).

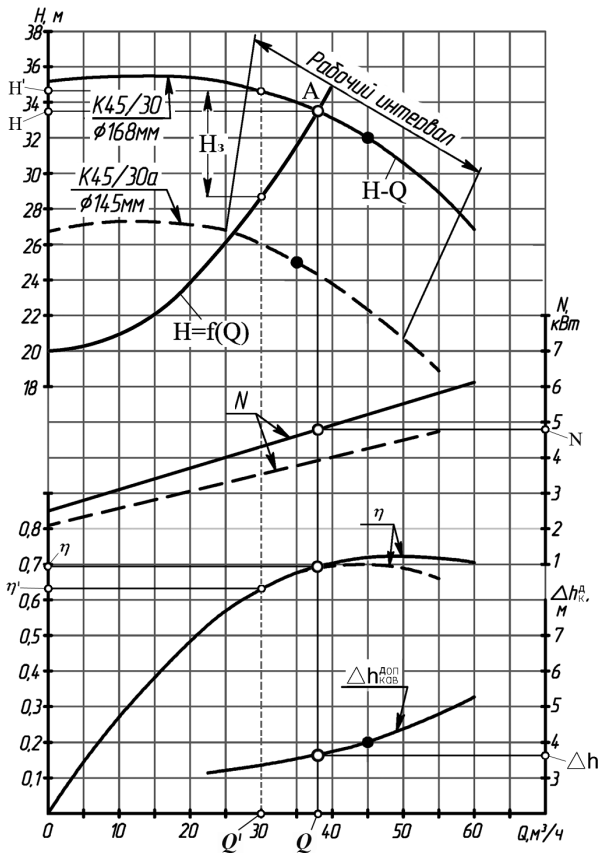


Рис. 3.8

Характеристики насоса и трубопровода

Т а б л и ц а 3.2

$Q, \text{ м}^3/\text{ч}$	0	10	20	30	40
$H, \text{ м}$	20,0	20,9	23,7	28,4	34,9

Режим работы насоса на данный трубопровод (рабочая точка) определяется точкой пересечения характеристики насоса с характеристикой трубопровода (точка А). Рабочей точке соответствует $Q \approx 38,0 \text{ м}^3/\text{ч}$, $H \approx 33,5 \text{ м}$, $N \approx 4,8 \text{ кВт}$, $\eta \approx 69\%$, $\Delta h_{\text{кав}}^{\text{доп}} \approx 3,6 \text{ м}$ (рис. 3.8).

3. Определить на характеристике насоса рабочую точку при расходе $Q' = 30 \text{ м}^3/\text{ч}$ и найти значения H' и η' . Новой рабочей точке соответствует $H' \approx 34,6 \text{ м}$ и $\eta' \approx 63\%$.

4. Определить по характеристикам насоса и трубопровода напор H_3 , который будет затрачен на преодоление сопротивлений, создаваемых задвижкой при изменении подачи насоса до $30 \text{ м}^3/\text{ч}$ $H_3 \approx 6 \text{ м}$ (рис. 3.8).

5. Вычислить мощность, теряемую на задвижке:

$$N_3 = \frac{\gamma Q' H_3}{\eta'} = \frac{9810 \cdot 0,0083 \cdot 6}{0,63} = 775,5 \text{ Вт}.$$

ЗАДАНИЕ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Центробежный насос поднимает воду из колодца в открытый резервуар (рис. 3.9) на высоту $h = \dots \text{ м}$, по трубопроводу диаметром $d = \dots \text{ мм}$, длиной $l = \dots \text{ м}$ (данные для расчета взять в таблице 3.3). Коэффициент гидравлического трения принять $\lambda = 0,03$. Местные потери напора считать равными 10% от потерь по длине.

Требуется определить подачу насоса при работе на данный трубопровод, развиваемый им напор, мощность на валу насоса его КПД и допустимый кавитационный запас. Для решения задачи воспользоваться характеристиками насосов (см. Приложение, рис. 2–11).

Определить, какая часть напора H_3 будет затрачена на преодоление сопротивлений, создаваемых задвижкой при изменении подачи насоса до $Q = \dots \text{ м}^3/\text{ч}$ и мощность N_3 теряемую при этом на задвижке.

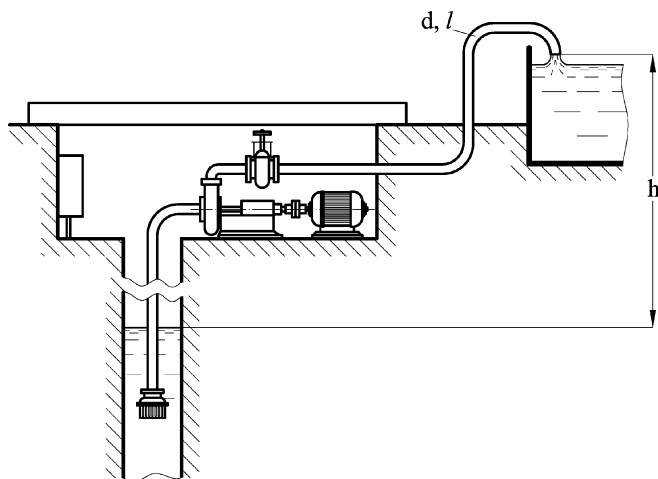


Рис. 3.9
Схема насосной установки

Т а б л и ц а 3.3

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Марка насоса	1К8/18	1К8/18	1К8/18а	1К50-32-125м	1К50-32-125	1К50-32-125б	1К20/30м	1К20/30	1К20/30б	1К65-50-160
h , м	15	14	12	15	14	13	20	18	16	26
d , мм	50	70	80	70	50	80	40	70	50	50
l , м	70	250	320	400	45	280	26	185	28	32
Q' , м ³ /ч	6	8,5	8	10	12	9	15	20	12	18
№ варианта	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Марка насоса	1К65-50-160а	1К65-50-160б	1К45/30	1К45/30	1К45/30а	1К80-50-200м	1К80-50-200	1К80-50-200б	1К100-80-160	1К100-80-160а
h , м	24	20	26	22	18	35	30	25	21	17
d , мм	90	70	90	80	70	90	125	100	150	125

Продолжение табл. 3.3

№ варианта	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
l , м	215	54	135	60	30	190	480	145	630	180
Q' , м ³ /ч	22	20	34	44	36	50	58	40	80	82
№ варианта	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Марка насоса	1K100-80-1606	1K100-65-200м	1K100-65-200	1K100-65-2006	1K100-65-250м	1K100-65-250	1K100-65-2506	1K150-125-315	1K150-125-315а	1K150-125-3156
h , м	13	40	35	30	60	55	50	20	18	16
d , мм	100	125	150	175	100	125	150	150	175	250
l , м	33	248	390	630	145	240	205	110	120	500
Q' , м ³ /ч	84	84	100	88	90	100	80	170	200	180

Контрольные вопросы и задания

1. Что такое статический напор насосной установки?
2. Как рассчитать сопротивление трубопроводов насосной установки?
3. Какая зависимость называется характеристикой трубопровода? Каким уравнением она описывается?
4. Что показывает характеристика трубопровода?
5. Объясните понятие рабочая точка.
6. Как получить рабочую точку? Чему она соответствует?
7. Может ли рабочая точка при работе насоса на один и тот же трубопровод принимать различные положения? Если да, то объясните, как это обеспечить?
8. Что произойдет с рабочей точкой, если подача насоса с помощью задвижки будет уменьшена?
9. Как изменится характеристика трубопровода, если изменится величина местных потерь?
10. Назовите параметры, необходимые для построения характеристик трубопровода.

Лабораторная работа № 3.3

ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНАЯ РАБОТА НАСОСОВ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучить теоретические сведения по теме лабораторной работы.
2. Построить напорные характеристики $H-Q$ одинаковых насосов при их параллельной и последовательной работе на общий трубопровод.
3. Убедиться в увеличении подачи насосной установки при параллельной работе и увеличении напора при последовательной работе двух насосов.
4. Сравнить экспериментальные напорные характеристики $H-Q$ с теоретическими, сделать выводы по работе.

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

Чтобы обеспечить необходимые подачу и напор насосной станции, устанавливают несколько насосов. Для увеличения напора насосы устанавливают последовательно, для увеличения подачи — параллельно.

Для анализа совместной работы насосов на общий трубопровод строят их суммарную характеристику.

Параллельная работа двух и более центробежных насосов возможна при условии равенства развиваемого ими напора. Если один из насосов имеет напор меньше, чем другие, то он может быть подключен в совместную параллельную работу, только начиная с момента, когда развиваемые насосами напоры будут равны.

Для построения суммарной характеристики двух одинаковых параллельно работающих насосов необходимо удвоить подачи насосов при равных напорах (рис. 3.10). Например, для нахождения точки в суммарной характеристике

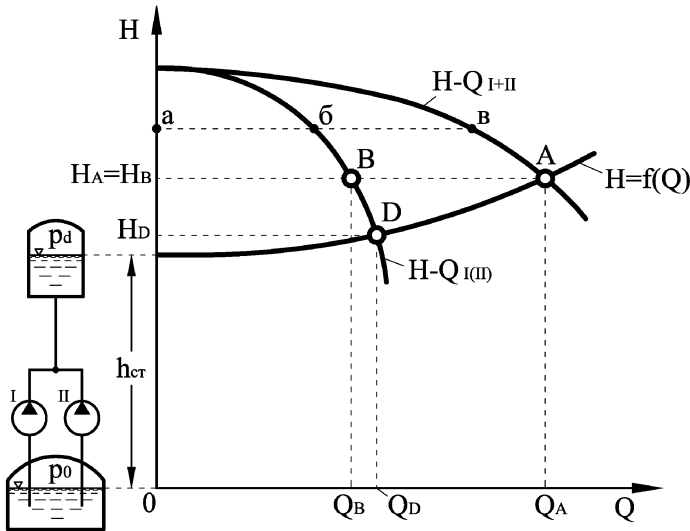


Рис. 3.10

Построение характеристики параллельной работы двух одинаковых центробежных насосов

$H-Q_{I+II}$ необходимо удвоить отрезок ab , т. е. отрезок $av = 2ab$. Таким образом, находят и другие точки суммарной характеристики.

Для определения режима совместной работы двух параллельно включенных насосов необходимо построить характеристику трубопровода. Рабочая точка будет находиться на пересечении суммарной характеристики насосов с характеристикой трубопровода.

Общая подача при параллельной работе двух насосов характеризуется абсциссой рабочей точки A и равна Q_A , а напор соответствует ординате этой точки, равной H_A .

Для того чтобы установить режим работы каждого из параллельно работающих насосов, необходимо через рабочую точку A провести линию параллельную оси абсцисс. Абсцисса, соответствующая точке пересечения этой линии с кривой $H-Q_{I(II)}$ насоса (точка B), определит расход Q_B , а ордината — напор $H_B = H_A$ каждого из параллельно работающих насосов. Следовательно, напор, развиваемый каждым насосом, равен напору, развиваемому двумя насосами при их параллельной работе, а подача каждого насоса равна половине суммарной подачи двух насосов.

При работе на данный трубопровод одного насоса режим его работы характеризовался бы точкой D . Как видно из рисунка 3.10, его подача при этом была бы больше, чем в случае параллельной работы.

Таким образом, суммарная подача насосов, работающих параллельно в общей системе, меньше, чем сумма подач этих же насосов при их раздельной работе. Это происходит из-за того, что при увеличении общего расхода жидкости, подаваемой в трубопровод, возрастают потери напора, а следовательно, увеличивается и напор, необходимый для подачи данного расхода, что влечет за собой уменьшение подачи каждого насоса.

Центробежные насосы включают в одну систему *последовательно* в тех случаях, когда напор, развиваемый одним насосом, недостаточен для подачи жидкости на требуемую высоту. При этом один насос подает жидкость во всасывающий патрубок другого, который подает ее далее в напорный трубопровод.

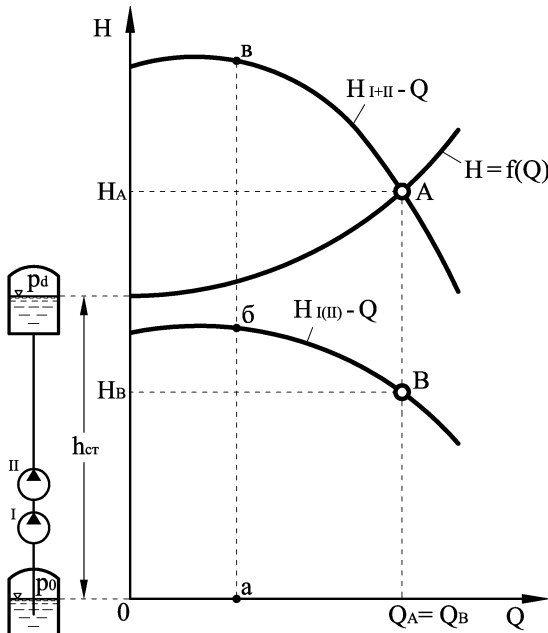


Рис. 3.11

Построение характеристики последовательной работы двух одинаковых центробежных насосов

Для построения суммарной характеристики последовательно работающих насосов необходимо сложить ординаты характеристик $H-Q$ этих насосов при одной и той же подаче, так как напор, развиваемый последовательно работающими насосами, равен сумме напоров, развиваемых каждым из этих насосов.

В случае последовательной работы двух насосов с одинаковыми характеристиками (рис. 3.11) ординаты (при данной подаче) удваиваются: $ав = 2аб$.

Рабочая точка последовательно включенных насосов (точка А) лежит на пересечении кривой совместной работы насосов с характеристикой трубопровода.

В случае последовательного включения двух насосов с неодинаковыми характеристиками суммарная кривая их совместной работы строится путем сложения ординат характеристик каждого из последовательно работающих насосов.

Описание экспериментальной установки (рис. 3.5) дано в лабораторной работе № 3.1 «Испытание центробежного насоса».

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1. Параллельная работа насосов.

1.1. Произвести внешний осмотр установки и убедиться в отсутствии видимых повреждений.

1.2. Залить воду в бак и заполнить насосы водой.

1.3. Открыть вентили 5, 12 и закрыть вентили 2, 8.

1.4. Включить установку в сеть, запустить насосы 1, 3.

1.5. При закрытом вентиле 8 снять показания мановакуумметра $p_{мв}$, манометра p_m и расходомера Q .

1.6. Частично открыть вентиль 8 и снять показания мановакуумметра $p_{мв}$, манометра p_m и расходомера Q .

1.7. Повторить опыт (п. 1.6), увеличивая степень открытия вентилей 8 до полного его открытия.

1.8. Выключить насосы и отключить установку от сети.

ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

1.1. Рассчитать напор насоса по формуле $H = \frac{p_m \pm p_{мв}}{\gamma}$.

1.2. На основе расчетов построить опытную характеристику насосов $H-2Q$.

1.3. Используя характеристику $H-Q$, полученную при испытании центробежного насоса (лабораторная работа № 3.1 «Испытание центробежного насоса»), построить суммарную рабочую характеристику при параллельной работе $H-Q_{I+II}$ двух одинаковых насосов, работающих на общий трубопровод.

1.4. Сравнить полученную характеристику с опытной, сделать выводы по работе.

Т а б л и ц а 3.4

Таблица опытных данных параллельной работы насосов

Наименование показателя	Обозначение	Единица измерения	Опыты							
			1	2	3	4	5	6	7	8
1. Давление по мановакуумметру	$p_{\text{мв}}$	Па								
2. Давление по манометру	$p_{\text{м}}$	Па								
3. Напор насосов	$H = \frac{p_{\text{м}} \pm p_{\text{мв}}}{\gamma}$	м								
4. Общая подача насосов	Q	м ³ /с								

2. Последовательная работа насосов.

2.1. Открыть вентиль 2 и закрыть вентили 5, 8, 12.

2.2. Включить установку в сеть, запустить насосы 1, 3.

2.3. При закрытом вентиле 8 снять показания мановакуумметра $p_{\text{мв}}$, манометра $p_{\text{м}}$ и расходомера Q .

2.4. Частично открыть вентиль 8 и снять показания мановакуумметра $p_{\text{мв}}$, манометра $p_{\text{м}}$ и расходомера Q .

2.5. Повторить опыт (п. 2.4), увеличивая степень открытия вентилей 8 до полного его открытия.

2.6. Выключить насосы и отключить установку от сети.

ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

2.1. Рассчитать напор насоса по формуле

$$H = \frac{p_{\text{м}} \pm p_{\text{мв}}}{\gamma}.$$

Т а б л и ц а 3.5

Таблица опытных данных последовательной работы насосов

Наименование показателя	Обозначение	Единица измерения	Опыты							
			1	2	3	4	5	6	7	8
1. Давление по мановакуумметру	$p_{\text{мв}}$	Па								
2. Давление по манометру	$p_{\text{м}}$	Па								
3. Напор насосов	$H = \frac{p_{\text{м}} \pm p_{\text{мв}}}{\gamma}$	м								
4. Общая подача насосов	Q	м ³ /с								

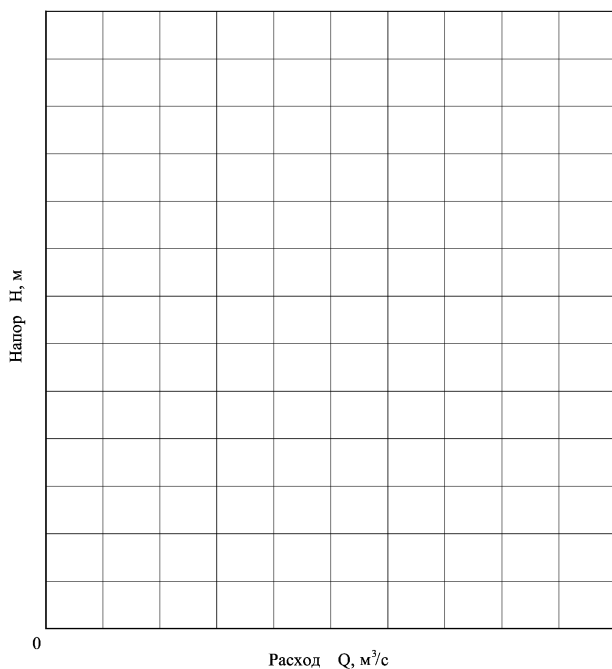


Рис. 3.12

Характеристики $H-Q$ для параллельной и последовательной работы центробежных насосов

2.2. На основе расчетов построить опытную характеристику насосов $2H-Q$.

2.3. Используя характеристику $H-Q$, полученную при испытании центробежного насоса (лабораторная работа № 3.1 «Испытание центробежного насоса»), построить суммарную рабочую характеристику при последовательной работе $Q_{I+II}-H$ двух одинаковых насосов, работающих на общий трубопровод.

2.4. Сравнить опытную и теоретическую характеристики и сделать выводы по работе.

Контрольные вопросы и задания

1. В каких случаях применяют параллельную работу центробежных насосов?

2. Для чего применяют последовательную работу центробежных насосов?

3. Каким образом строят характеристики параллельной работы одинаковых насосов на данный трубопровод?

4. Каким образом строят характеристики последовательной работы одинаковых насосов на данный трубопровод?

5. Как определить эффективность параллельной работы центробежных насосов на общий трубопровод?

6. Как определить эффективность последовательной работы центробежных насосов на общий трубопровод?

7. Как изменяется расход в напорном трубопроводе при увеличении числа параллельно работающих на него насосов?

8. Как изменится напор при увеличении числа последовательно работающих насосов?

9. Для чего строится характеристика трубопровода при оценке параллельной и последовательной работы насосов?

10. Как изменятся положения рабочей точки при параллельной и последовательной работе насосов?

Лабораторно-практическая работа № 3.4

ПОДБОР НАСОСА ПО КАТАЛОГУ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучить теоретические сведения по теме лабораторно-практической работы.
2. Подобрать марку насоса по заданным подаче и напору. Определить его конструктивные и рабочие параметры, сделать выводы по работе.

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

Насос выгодно эксплуатировать только в области высоких КПД и малых кавитационных запасов, поэтому используется не вся характеристика насоса, а только ее часть. Желательно, чтобы отклонения КПД насоса, выбранного для заданного режима работы, составляли не более 5...10%.

Если на характеристиках, соответствующих необточенному и максимально обточенному колесам, нанести точки, ограничивающие рабочие зоны (зоны с наибольшим КПД), и соединить их прямыми линиями, то получится криволинейный четырехугольник $ABCD$, называемый полем насоса, или полем $H-Q$ насоса (рис. 3.13).

В каталогах-справочниках приводятся сводные графики полей насосов, с помощью которых удобно подбирать насос по заданным режимам работы.

Сводный график полей насосов обычно строиться в логарифмических координатах по значениям H и Q и является совокупностью индивидуальных графиков в рабочих зонах соответствующих насосов. Каждый такой график представляет собой флажок со средней линией или без нее. Флажок без средней линии является характеристикой $H-Q$ в рабочей зоне при необточенном и максимально обточен-

ном рабочем колесе. Флажок со средними линиями представляет характеристику $H-Q$ в рабочей зоне с увеличенным, основным, промежуточным и максимально обточенным рабочим колесом. Если на графике показан только криволинейный отрезок, то это свидетельствует о том, что для данного насоса не допускается обточка рабочего колеса.

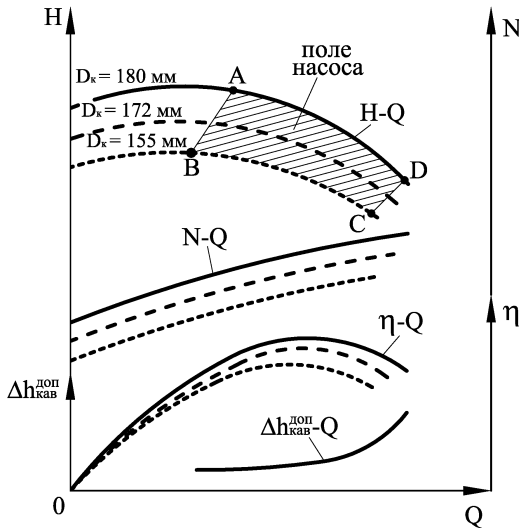


Рис. 3.13

Рабочая область характеристики центробежного насоса

Выбор центробежного насоса, как и насосов других марок, осуществляют по заданным H и Q . На сводном графике откладывается точка с координатами H и Q . Если эта точка попадает внутрь флажка, то выбирается данный насос, но если точка расположена между двумя, верхним и нижним флажками, то принимают верхний насос. Затем по рабочей характеристике данного насоса определяют требуемый диаметр рабочего колеса, мощность (N), КПД (η), допустимый кавитационный запас ($\Delta h_{\text{кав}}^{\text{доп}}$). Также определяют разность между напором, развиваемым насосом при данной подаче, и заданным напором. Эта разность устраняется посредством задвижки и носит название потерь напора на задвижке (H_3).

Электродвигатель подбирается по каталогу по максимальной потребляемой насосом мощности при выбранном диаметре рабочего колеса.

ПРИМЕР ПОДБОРА НАСОСА ПО СВОДНОМУ ГРАФИКУ РАБОЧИХ ПОЛЕЙ

Необходимо выбрать марку насоса для подачи $Q = 70$ м³/ч при напоре $H = 35$ м, а также определить диаметр рабочего колеса, развиваемую мощность, КПД, допускаемый кавитационный запас, потери напора на задвижке и подобрать электродвигатель.

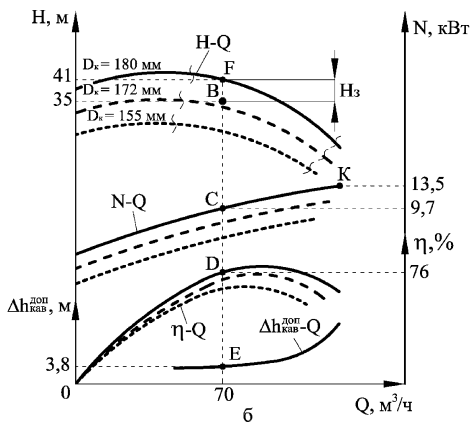
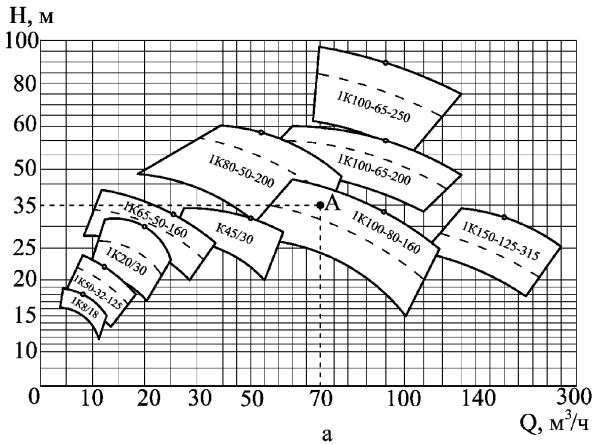


Рис. 3.14

Подбор насоса:

а — сводный график полей;
б — характеристика насоса 1К 100-80-160.

Для подбора насоса необходимо выполнить следующее.

1. На сводном графике откладываем точку с координатами $H = 35$ м и $Q = 70$ м³/ч (рис. 3.14а, точка А). Точка попадает в рабочее поле насоса 1К100-80-160, следовательно, насос соответствует заданным параметрам.

2. На характеристике выбранного насоса наносим точку с такими же координатами ($H = 35$ м и $Q = 70$ м³/ч) (рис. 3.14б, точка В). Для этой точки выбираем ближайшую верхнюю характеристику $H-Q$, которой соответствует рабочее колесо с диаметром $D_k = 180$ мм. Характеристика, расположенная ниже, не представляет интерес, поскольку при таком диаметре рабочего колеса насос не обеспечит требуемые параметры.

3. Поднимая из точки на оси ординат, соответствующей подаче $Q = 70$ м³/ч, перпендикуляр, находим его точки пересечения с характеристиками, относящимися к выбранному диаметру рабочего колеса $H-Q$, $N-Q$, $\eta-Q$, $\Delta h_{\text{кав}}^{\text{доп}}-Q$. Рабочие параметры насоса — мощность $N = 9,7$ кВт (рис. 3.14б, точка С), КПД $\eta = 76\%$ (точка D), допускаемый кавитационный запас $\Delta h_{\text{кав}}^{\text{доп}} = 3,8$ м (точка E) и напор $H_n = 41$ м (точка F).

4. Для обеспечения требуемого напора необходимо прикрыть задвижку на напорном трубопроводе. Потери напора на задвижке найдем как разницу напора, обеспечиваемого насосом, при заданной подаче H_n и требуемым напором H :

$$H_3 = H_n - H = 41 - 35 = 6 \text{ м.}$$

5. По таблице 11 приложения определяется марка комплектующего электродвигателя при максимальной мощности и выбранном диаметре рабочего колеса. $N_{\text{max}} = 13,5$ кВт (рис. 3.14б, точка К), следовательно, необходимо принять в соответствии с таблицей 11 приложения, где представлены основные параметры насосно-силового оборудования, электродвигатель марки АИР160Э2 с номинальной мощностью $N_{\text{эл}} = 15$ кВт.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

По заданным напору и подаче подобрать насос и электродвигатель. Определить частоту вращения рабочего колеса насоса и его диаметр, потребляемую мощность, КПД, допускаемый кавитационный запас и ту часть напора H_3 , которая будет затрачиваться на преодоление гидравлических сопротивлений в задвижке, если посредством задвижки

будет обеспечиваться заданная условием подача насоса. Для выбранного насоса указать марку комплектующего электродвигателя его напряжение питания и мощность.

При выполнении задания использовать: сводный график полей насосов (Приложение, рис. 12), характеристики насосов (Приложение, рис. 2–11) и параметры насосно-силового оборудования (Приложение, табл. 11).

Исходные данные по вариантам представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
H , м	15	20	25	30	30	40	25	50	80	25
Q , м ³ /ч	10	10	20	25	40	40	80	100	80	220
№ варианта	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
H , м	15	20	30	23	50	35	30	45	20	55
Q , м ³ /ч	15	20	10	50	45	60	100	80	220	115
№ варианта	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
H , м	65	45	35	20	12	20	35	16	30	17
Q , м ³ /ч	120	50	30	70	15	140	130	35	15	5

Контрольные вопросы и задания

1. Что называют рабочими характеристиками насосов? Какие рабочие характеристики центробежных насосов Вы знаете?
2. Что такое поле (флажок) насоса? Как оно строится?
3. Что представляют собой сводные графики рабочих полей насосов? Как они строятся и для чего служат?
4. Что обозначает флажок насоса со средней линией и без нее?
5. Как на характеристике насоса отображается недопустимость обточки рабочего колеса?
6. Как по сводному графику полей насосов зная подачу и напор выбрать требуемый насос?
7. Как по рабочей характеристике насоса выбрать диаметр рабочего колеса насоса?
8. Как определяют рабочие параметры выбранного насоса при его подборе по каталогу?
9. Зачем определяют потери напора на задвижке при подборе насоса, как это осуществляется?
10. По каким параметрам выбирают марку приводного электродвигателя насоса?

Лабораторная работа № 3.5

КАВИТАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучить теоретические сведения по теме лабораторной работы.
2. Убедиться на практике в существовании явления кавитации и уяснить причины ее возникновения.
3. Освоить методику кавитационных испытаний центробежного насоса.
4. Получить в результате испытаний кавитационную характеристику насоса, сделать выводы по работе.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

Движение жидкости по всасывающему трубопроводу и подвод ее к рабочему колесу насоса осуществляем за счет разности давлений над свободной поверхностью жидкости в источнике и абсолютного давления в потоке у входа в рабочее колесо насоса. Однако эта разность давлений не является постоянной.

Для случая, когда свободная поверхность жидкости в открытом источнике расположена ниже оси насоса (рис. 3.15а), геометрическая высота всасывания определяется из уравнения Бернулли, составленного для сечений 0–0, 1–1.

$$H_s = \frac{p_{\text{атм}} - p_1}{\gamma} - \frac{v_1^2}{2g} - h_{ws},$$

где h_{ws} — потери напора во всасывающей трубе, м.

Величина $\frac{p_{\text{атм}} - p_1}{\gamma} = \frac{p_{\text{в}}}{\gamma} = H_{\text{вак}}$ называется *вакуумметрической высотой всасывания* насоса, и геометрическая высота всасывания

$$H_s = H_{\text{вак}} - \frac{v_1^2}{2g} - h_{ws}.$$

Если же забор жидкости насосом производится из открытого источника, уровень свободной поверхности которого расположен выше оси рабочего колеса насоса (рис. 3.15б), то

$$H_s = \frac{v_1^2}{2g} + h_{ws} - H_{\text{вак}}.$$

Отрицательное значение геометрической высоты всасывания называют *подпором*. При достаточном подпоре давление на входе в насос может устанавливаться больше атмосферного на всех режимах его работы.

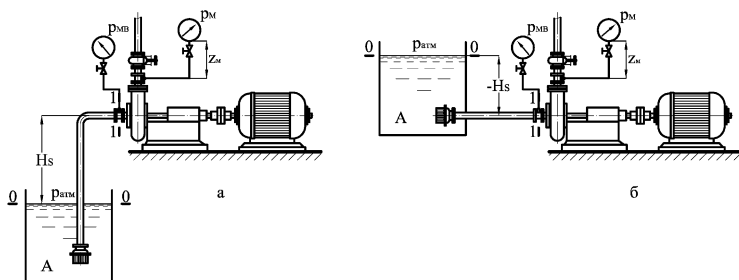


Рис. 3.15

Определение геометрической высоты всасывания:

а — положительная; б — отрицательная.

Допустимая геометрическая высота всасывания насоса (H_s)_{доп} будет зависеть от *допустимой вакуумметрической высоты всасывания* насоса $H_{\text{вак}}^{\text{доп}}$ — вакуумметрической высоты всасывания, при которой обеспечивается работа насоса без изменения основных технических показателей, связанных с возникновением в насосе явления кавитации.

Кавитация (от лат. cavitas — пустота) — образование в жидкости полостей (кавитационных пузырьков, или каверн), заполненных газом, паром или их смесью. Кавитация

возникает в результате местного понижения давления в жидкости, которое происходит при увеличении ее скорости. Кавитационные пузырьки уносятся потоком в область с более высоким давлением, где разрушаются практически бесследно вследствие конденсации заполняющего их пара. При конденсации пузырьков пара давление внутри пузырька остается постоянным и равным упругости насыщенного пара, давление же жидкости повышается по мере продвижения пузырька. Частицы жидкости, окружающие пузырек, находятся под действием все возрастающей разности давления жидкости и давления внутри пузырька и движутся к его центру ускоренно. При полной конденсации пузырьков происходит столкновение частиц жидкости, сопровождающееся мгновенным местным повышением давления, достигающим тысяч атмосфер, и ударами жидкости о стенки каналов.

В каталогах насосов приводятся кривые зависимости допустимой вакуумметрической высоты всасывания от расхода $H_{\text{вак}}^{\text{доп}} - Q$ или кривые допустимого кавитационного запаса $\Delta h_{\text{кав}}^{\text{доп}} - Q$. Эти кривые построены с учетом кавитации для воды с температурой до 20°C и при атмосферном давлении равном 10 м вод. ст. (рис. 3.16).

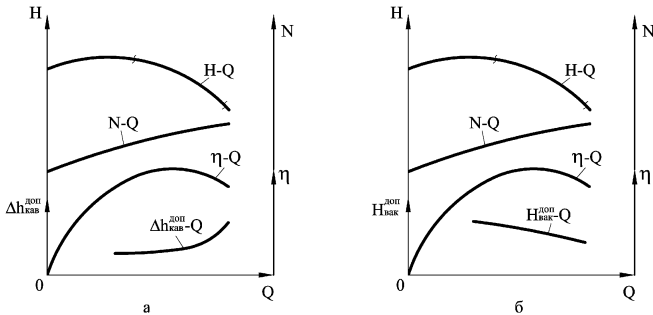


Рис. 3.16

Характеристика насоса:

а — с кривой допустимого кавитационного запаса $\Delta h_{\text{кав}}^{\text{доп}} - Q$;

б — с кривой допустимой вакуумметрической высоты всасывания $H_{\text{вак}}^{\text{доп}} - Q$.

Геометрическая высота всасывания, определяющая компоновочное решение насосной станции, не дает возможности численно оценить степень развития кавитации. Поэтому в насосостроении для сравнения кавитационных качеств на-

соса, количественной оценки степени развития кавитации пользуются понятием кавитационного запаса.

Кавитационный запас — превышение полного напора жидкости во всасывающем патрубке насоса над давлением насыщенных паров $p_{н.п.}$ этой жидкости и определяется зависимостью

$$\Delta h_{\text{кав}} = \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} - \frac{p_{н.п.}}{\gamma},$$

где p_1 — абсолютное давление жидкости на входе в насос, Па; $p_{н.п.}$ — давление насыщенных паров жидкости, Па; v_1 — средняя скорость жидкости на входе в насос, м/с.

Допустимый кавитационный запас $\Delta h_{\text{кав}}^{\text{доп}}$ — кавитационный запас, обеспечивающий работу насоса без изменения основных технических показателей, связанных с возникновением в насосе явления кавитации:

$$\Delta h_{\text{кав}}^{\text{доп}} = (1,2 \dots 1,3) \Delta h_{\text{кав}}^{\text{кр}}.$$

$\Delta h_{\text{кав}}^{\text{кр}}$ определяется по кавитационной характеристике насоса. Применительно к лопастным насосам $\Delta h_{\text{кав}}^{\text{кр}}$ может быть подсчитан по формуле С. С. Руднева

$$\Delta h_{\text{кав}}^{\text{кр}} = 10 \left(\frac{n \sqrt{Q}}{C} \right)^{4/3},$$

где n — частота вращения рабочего колеса насоса, мин⁻¹; Q — подача насоса, м³/с; C — кавитационный коэффициент быстроходности, зависящий от конструктивных особенностей насоса. При оптимальном режиме для обычных насосов $C = 800-1000$, для насосов с повышенными кавитационными свойствами $C = 1300-3000$.

Допустимая геометрическая высота всасывания определяется:

$$(H_s)_{\text{доп}} = \frac{p_{\text{атм}} - p_{н.п.}}{\gamma} - \Delta h_{\text{кав}}^{\text{доп}} - h_{ws}.$$

Внешним проявлением кавитации в центробежных насосах является наличие шума, вибрации, падение напора, подачи, мощности и КПД. Очевидно, что работа насоса в кавитационном режиме недопустима.

Количественной оценкой степени развития кавитации является кавитационный запас $\Delta h_{\text{кав}}$ — превышение удельной энергии жидкости при входе в насос над удельной энергией её насыщенных паров.

Давление насыщенного пара — это давление, при котором пар находится в динамическом равновесии с жидкостью. Происходит постоянный хаотический переход некоторого количества молекул из пара в жидкость и обратно, но в среднем концентрация молекул пара не изменяется.

Давление насыщенных паров жидкости на входе в насос зависит от рода жидкости и ее температуры. Для воды эта зависимость представлена на рисунке 3.17.

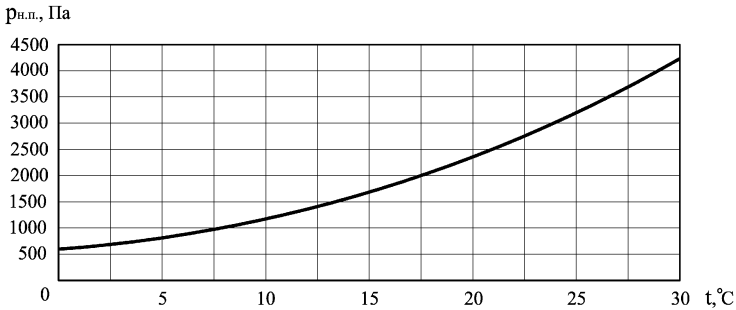


Рис. 3.17

Зависимость давления насыщенных паров воды от температуры

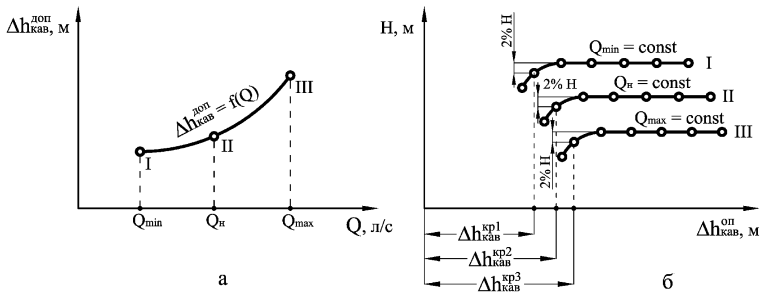


Рис. 3.18

Характеристики насоса:

а — кавитационная; б — частная кавитационная.

Критический кавитационный запас определяется путем проведения кавитационных испытаний насоса, в результате которых для каждого режима работы насоса получают кавитационную характеристику (рис. 3.18а), которая представляет собой зависимость напора и мощности от кавитационного запаса при постоянных частотах вращения и подаче. При больших значениях $\Delta h_{\text{кав}}$ кавитационные явления

отсутствуют, и значения напора и мощности от кавитационного запаса не зависят.

Режим, при котором начинается падение напора и мощности, называют *первым критическим режимом*, которому соответствует *первый критический кавитационный запас* $\Delta h_{\text{кав}}^{\text{кр}1}$. Достижение *второго кавитационного запаса* $\Delta h_{\text{кав}}^{\text{кр}2}$ ведет к полному отрыву потока от лопасти. В начальной стадии процесса, когда $\Delta h_{\text{кав}}^{\text{кр}2} < \Delta h < \Delta h_{\text{кав}}^{\text{кр}1}$ зона распространения кавитационных явлений невелика (имеется местная кавитация). Поэтому кавитация при этом мало сказывается на напоре и мощности. По мере уменьшения кавитационного запаса в этой стадии процесса, кавитационная область медленно увеличивается, что сопровождается постепенным изменением напора и мощности. При достижении второго кавитационного запаса происходит резкое уменьшение напора и мощности, а затем и полный срыв работы насоса.

У многих тихоходных насосов первый критический режим на кавитационной характеристике не обнаруживается. Здесь приходится ограничиваться только вторым критическим режимом.

В инженерной практике вводится понятие *допустимого кавитационного запаса*:

$$\Delta h_{\text{кав}}^{\text{доп}} = A \cdot \Delta h_{\text{кав}}^{\text{кр}1},$$

где A — коэффициент запаса, устанавливаемый в зависимости от типа и условий работы насоса (рис. 3.19).

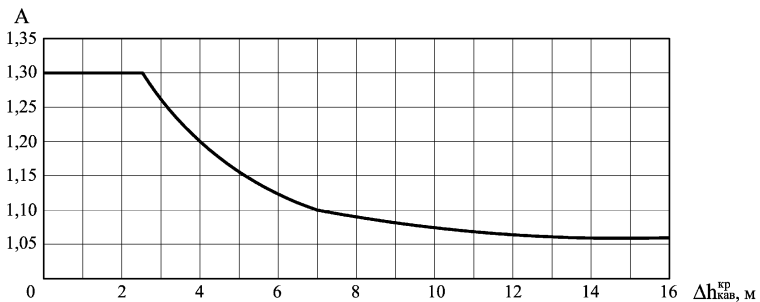


Рис. 3.19

Зависимость коэффициента кавитационного запаса от величины критического кавитационного запаса

С. С. Рудневым предложена формула для определения минимального кавитационного запаса энергии на всасывании:

$$\Delta h_{\text{кав}}^{\text{кр}1} = 10 \left(\frac{n\sqrt{Q}}{C_{\text{кр}}} \right)^{4/3}.$$

где n — частота вращения, мин^{-1} ; Q — подача насоса, $\text{м}^3/\text{с}$; $C_{\text{кр}}$ — кавитационный коэффициент быстроходности, зависящий от конструктивных особенностей насосов.

Графическая зависимость допускаемого кавитационного запаса от подачи в рабочем интервале подач $\Delta h_{\text{кав}}^{\text{доп}} = f(Q)$ называется кавитационной характеристикой насоса (рис. 3.18а). Ее получают при кавитационных испытаниях насоса по частным кавитационным характеристикам.

Частная кавитационная характеристика — это зависимость напора насоса от кавитационного запаса при постоянной частоте вращения, подаче и температуре жидкости, $H = f(\Delta h_{\text{кав}}^{\text{оп}})$ (рис. 3.18б).

При испытаниях насоса кавитационный запас определяется по формуле

$$\Delta h_{\text{кав}}^{\text{оп}} = \frac{p_{\text{атм}} - p_{\text{вак}} - p_{\text{н.п.}}}{\gamma} + \frac{v^2}{2g}, \text{ м},$$

где $p_{\text{атм}}$ — атмосферное давление, Па; $p_{\text{вак}}$ — показания вакуумметра, Па; $p_{\text{н.п.}}$ — давление насыщенных паров жидкости, Па; v — средняя скорость движения потока жидкости во всасывающем трубопроводе, $\text{м}/\text{с}$.

Используя полученные опытным путем значения $\Delta h_{\text{кав}}^{\text{оп}}$, строят частную кавитационную характеристику насоса (рис. 3.18б), по которой находят критический $\Delta h_{\text{кав}}^{\text{кр}}$ и допустимый $\Delta h_{\text{кав}}^{\text{доп}}$ кавитационные запасы.

По значениям допустимого кавитационного запаса $\Delta h_{\text{кав}}^{\text{доп}}$ и подаче насоса Q (трем ее значениям — минимальной, максимальной и номинальной подачам насоса) строят кавитационную характеристику $\Delta h_{\text{кав}}^{\text{доп}} = f(Q)$ (рис. 3.18а).

Допустимая геометрическая высота всасывания, т. е. высота при которой обеспечивается бескавитационная работа насоса, вычисляется по формуле

$$(H_s)_{\text{доп}} = \frac{p_{\text{атм}} - p_{\text{н.п.}}}{\gamma} - \Delta h_{\text{кав}}^{\text{доп}} - h_{ws}, \text{ м},$$

где h_{ws} — суммарные потери напора во всасывающем трубопроводе, м.

Описание экспериментальной установки (рис. 3.5) дано в лабораторной работе № 1 «Испытание центробежного насоса».

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1.

Построение частных кавитационных характеристик

1. Включить насос 3 и обеспечить максимальную заданную подачу (30 л/мин) вентилем 8.

2. Записать показания манометра 6, мановакуумметра 11, расходомера 10 и термометра 15.

3. Прикрывать вентиль 12 на всасывающем трубопроводе до тех пор, пока показание манометра не уменьшится на 0,1 бар, одновременно приоткрывая вентиль 8 на напорном трубопроводе, для сохранения постоянной подачи насоса.

4. После установки заданной подачи записать показания всех приборов.

5. Повторять п. 2, 3 до резкого падения напора насоса (показание манометра 6 равно нулю).

6. Установить номинальную заданную подачу (20 л/мин) вентилем 8 и повторить п. 2–5 при номинальной подаче.

7. Установить минимальную заданную подачу (10 л/мин) вентилем 8 и повторить п. 2–5 при минимальной подаче.

ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

1. Определить напор насоса по эксплуатационной формуле:

$$H = \frac{P_{\text{м}} + P_{\text{вак}}}{\gamma}.$$

2. Определить площадь сечения трубопровода:

$$\omega = \frac{\pi d^2}{4}.$$

3. Определить среднюю скорость движения жидкости в трубопроводе:

$$v = \frac{Q}{\omega}.$$

4. Определить давление насыщенных паров по графику $p_{\text{н.п.}} = f(t)$ (рис. 3.17).

5. Определить кавитационный запас по формуле:

$$\Delta h_{\text{кав}}^{\text{оп}} = \frac{p_{\text{атм}} - p_{\text{вак}} - p_{\text{н.п.}}}{\gamma} + \frac{v^2}{2g}.$$

6. Результаты вычислений записать в таблицу 3.7 и построить по ним три частные кавитационные характеристики $H = f(\Delta h_{\text{кав}}^{\text{оп}})$ для максимальной, номинальной и минимальной подачи насоса (рис. 3.20).

Т а б л и ц а 3.7

Таблица опытных данных для построения частной кавитационной характеристики

Наименование показателя	Обозначение	Единица измерения	Опыт					
			1	2	3	4	5	6
1. Диаметр трубопровода	d	м						
2. Площадь сечения трубопровода	$\omega = \frac{\pi d^2}{4}$	м ²						
3. Атмосферное давление	$p_{\text{атм}}$	Па						
4. Температура воды	t	°С						
5. Давление насыщенных паров (по графику)	$p_{\text{н.п.}}$	Па						
Данные для построения частной кавитационной характеристики $H = f(\Delta h_{\text{кав}}^{\text{оп}})$ при максимальной подаче насоса								
6. Давление по манометру	$p_{\text{м}}$	бар						
		Па						
7. Давление по мановакуумметру	$p_{\text{вак}}$	бар						
		Па						
8. Напор насоса	$H = \frac{p_{\text{м}} + p_{\text{вак}}}{\gamma}$	м						
9. Подача насоса	Q	л/мин	30					
		м ³ /с						
10. Средняя скорость движения жидкости в трубопроводе	$v = \frac{Q}{\omega}$	м/с						

Продолжение табл. 3.7

Наименование показателя	Обозначение	Единица измерения	Опыт					
11. Кавитационный запас	$\Delta h_{\text{кав}}^{\text{оп}} = \frac{p_{\text{атм}} - p_{\text{вак}} - p_{\text{н.п.}}}{\gamma} + \frac{v^2}{2g}$	м						
Данные для построения частной кавитационной характеристики $H = f(\Delta h_{\text{кав}}^{\text{оп}})$ при номинальной подаче насоса								
12. Давление по манометру	$p_{\text{м}}$	бар						
		Па						
13. Давление по мановакуумметру	$p_{\text{вак}}$	бар						
		Па						
14. Напор насоса	$H = \frac{p_{\text{м}} + p_{\text{вак}}}{\gamma}$	м						
15. Подача насоса	Q	л/мин	20					
		м³/с						
16. Средняя скорость движения жидкости в трубопроводе	$v = \frac{Q}{\omega}$	м/с						
17. Кавитационный запас	$\Delta h_{\text{кав}}^{\text{оп}} = \frac{p_{\text{атм}} - p_{\text{вак}} - p_{\text{н.п.}}}{\gamma} + \frac{v^2}{2g}$	м						
Данные для построения частной кавитационной характеристики $H = f(\Delta h_{\text{кав}}^{\text{оп}})$ при минимальной подаче насоса								
18. Давление по манометру	$p_{\text{м}}$	бар						
		Па						
19. Давление по мановакуумметру	$p_{\text{вак}}$	бар						
		Па						
20. Напор насоса	$H = \frac{p_{\text{м}} + p_{\text{вак}}}{\gamma}$	м						
21. Подача насоса	Q	л/мин	10					
		м³/с						

Продолжение табл. 3.7

Наименование показателя	Обозначение	Единица измерения	Опыт
25. Средняя скорость движения жидкости в трубопроводе	$v = \frac{Q}{\omega}$	м/с	
26. Кавитационный запас	$\Delta h_{\text{кав}}^{\text{оп}} = \frac{p_{\text{атм}} - p_{\text{вак}} - p_{\text{н.п.}}}{\gamma} + \frac{v^2}{2g}$	м	

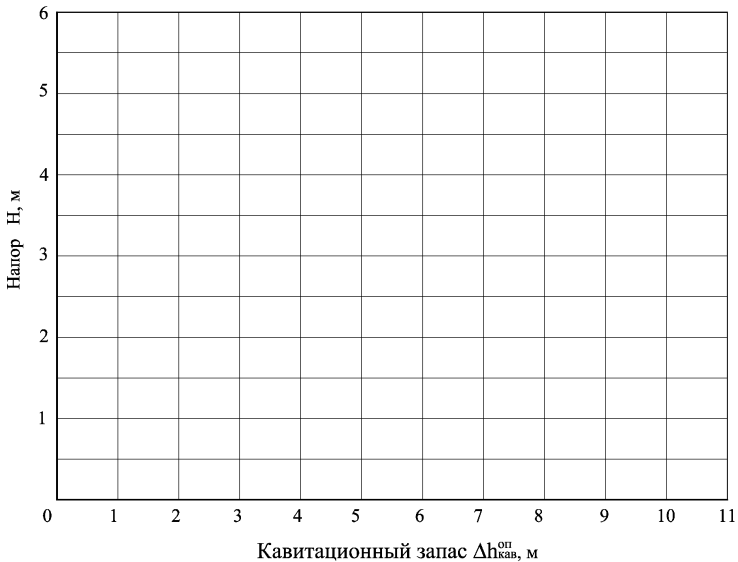


Рис. 3.20

Частные кавитационные характеристики насоса

2.

Построение кавитационной характеристики

1. Определить критический кавитационный запас $\Delta h_{\text{кав}}^{\text{кр}}$ по падению напора на 2% на кривой $H = f(\Delta h_{\text{кав}}^{\text{оп}})$ (для максимальной, номинальной и минимальной подачи насоса) (рис. 3.20).

2. Определить коэффициент кавитационного запаса A по графику $A = f(\Delta h_{\text{кр}})$ (рис. 3.19).

3. Определить допускаемый кавитационный запас по формуле

$$\Delta h_{\text{КАВ}}^{\text{доп}} = A \Delta h_{\text{КАВ}}^{\text{кр}}.$$

4. Определить суммарные потери напора во всасывающем трубопроводе:

$$h_{ws} = h_{Ls} + h_{ms} = \left(\lambda_s \frac{L_s}{d_s} + \sum \xi_s \right) \frac{v_s^2}{2g}.$$

5. Определить допустимую геометрическую высоту всасывания, т. е. высоту, при которой обеспечивается бескавитационная работа насоса, по формуле

$$(H_s)_{\text{доп}} = \frac{P_{\text{атм}} - P_{\text{н.п.}}}{\gamma} - \Delta h_{\text{КАВ}}^{\text{доп}} - h_{ws}.$$

6. Результаты расчетов свести в таблицу 3.8, построить кавитационную характеристику $\Delta h_{\text{КАВ}}^{\text{доп}} = f(Q)$ (рис. 3.21).

7. Сделать выводы по работе.

Т а б л и ц а 3.8

Таблица опытных данных для построения кавитационной характеристики

Наименование показателя	Обозначение	Единица измерения	Частные характеристики		
			1	2	3
1. Коэффициент гидравлического трения по длине всасывающего трубопровода	λ_s	—			
2. Суммарный коэффициент местных потерь для всасывающего трубопровода	$\sum \xi_s$	—			
3. Длина всасывающего трубопровода	L_s	м			
4. Подача насоса	Q	л/мин			
		м ³ /с			

Продолжение табл. 3.8

Наименование показателя	Обозначение	Единица измерения	Частные характеристики		
5. Средняя скорость движения жидкости в трубопроводе	$v = \frac{Q}{\omega}$	м/с			
6. Критический кавитационный запас	$\Delta h_{\text{кав}}^{\text{кр}}$	м			
7. Коэффициент кавитационного запаса	A	—			
8. Допустимый кавитационный запас	$\Delta h_{\text{кав}}^{\text{доп}} = A \Delta h_{\text{кав}}^{\text{кр}}$	м			
9. Суммарные потери напора во всасывающем трубопроводе	$h_{ws} = h_{Ls} + h_{ms} = \left(\lambda_s \frac{L_s}{d_s} + \sum \xi_s \right) \frac{v_s^2}{2g}$	м			
10. Допустимая геометрическая высота всасывания	$(H_s)_{\text{доп}} = \frac{p_{\text{атм}} - p_{\text{н.п.}}}{\gamma} - \Delta h_{\text{кав}}^{\text{доп}} - h_{ws}$	м			

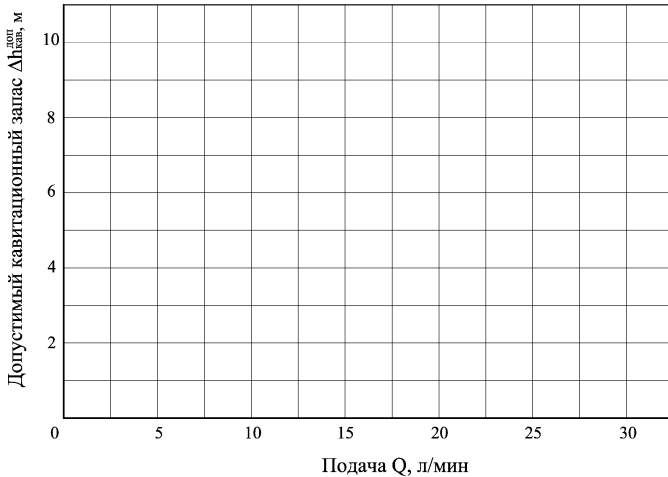


Рис. 3.21

Кавитационная характеристика насоса

Контрольные вопросы

1. В чем заключается физическая сущность кавитации и ее последствия для насосов?
2. Что такое геометрическая высота всасывания, как она определяется?
3. В каком случае геометрическая высота всасывания может быть отрицательной, каким образом она рассчитывается?
4. Что такое допустимая вакуумметрическая высота всасывания?
5. Как определяется допустимая вакуумметрическая высота всасывания?
6. Что такое кавитационный запас? Как он рассчитывается?
7. Что такое частные кавитационные характеристики? Как они строятся?
8. Что такое давление насыщенных паров жидкости?
9. Каким образом допустимая геометрическая высота всасывания связана с кавитационным запасом?
10. Как определяется напор насоса на действующей установке при кавитационных испытаниях?

Лабораторная работа № 3.6

ИСПЫТАНИЕ ШЕСТЕРЕННОГО НАСОСА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучить теоретические сведения по теме лабораторной работы.
2. Выявить зависимость подачи Q и мощности N от давления p насоса.
3. Построить рабочие характеристики $Q-p$, $N-p$ по опытными данным, сделать выводы по работе.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

Объемные насосы действуют по принципу вытеснения жидкости в нагнетательный трубопровод твердым рабочим телом и разделяются на: возвратно-поступательные, роторные и возвратно-поворотные.

Средняя производительность в секунду объемных насосов определяется по формуле

$$Q = \eta_v \frac{W \cdot n}{60},$$

где W — объем, вытесняемый насосом в нагнетательный трубопровод за один цикл (один оборот вала кривошипа в поршневых насосах или ротора в роторных насосах); n — число циклов в минуту; η_v — объемный КПД.

Область нагнетания в объемных насосах отделена от области всасывания (с помощью клапанов в поршневых насосах или самих вытеснителей в роторных насосах). Поэтому жидкие частицы наращивают свою энергию сразу (или почти сразу), в составе целого объема, одновременно вытесняемого в нагнетательный трубопровод. В отличие от лопастных насосов, пуск в ход объемных насосов при закрытой задвижке и вообще перекрытие напорного трубо-

провода в процессе работы недопустимы, так как это приведет к резкому увеличению давления и может вызвать поломку насоса. Это требование соблюдается и при наличии предохранительного клапана, так как последний рассчитан лишь на кратковременный перепуск жидкости.

Рабочим органом шестеренного насоса (рис. 3.22) является пара шестерен, одна из которых ведущая, а другая ведомая, свободно вращающаяся на короткой неподвижной оси, укрепленной в корпусе насоса. При вращении шестерен перекачиваемая жидкость (масло, нефть, мазут) вытесняется зубьями из области всасывания в область нагнетания.

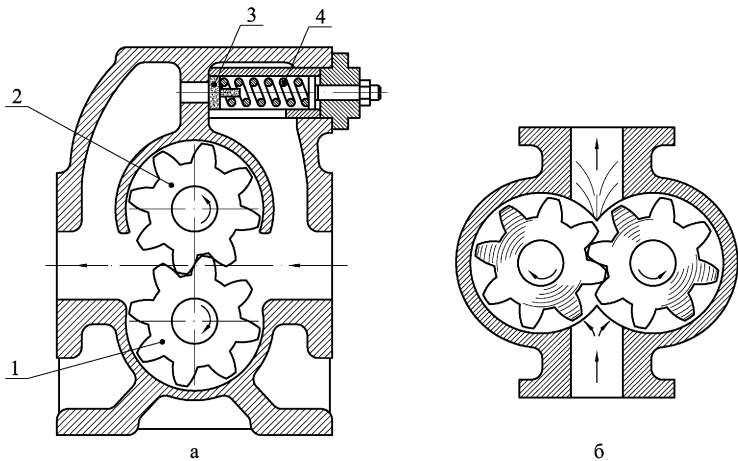


Рис. 3.22

Схема шестеренного насоса:

a — конструктивная схема; *б* — схема движения рабочей жидкости в насосе:
 1 — ведущая шестерня; 2 — ведомая шестерня; 3 — предохранительный клапан;
 4 — пружина.

Эти области изолируются друг от друга зубьями шестерен, входящими в зацепление. Всасывание обеспечивается тем, что выходящая из зацепления пара зубьев освобождает объем, занятый зубом шестерни. Нагнетание жидкости создается зубьями, входящими в зацепление и выдавливающими объем, содержащийся во впадине, которую они занимают. При достижении предельного давления предохранительный клапан регулируемый пружиной перепускает жидкость в область всасывания. Шестеренные насосы

просты по конструкции, малогабаритны, компактны, надежны и долговечны, могут работать при большом числе оборотов (до 3000 и более в минуту). Применяются в системах смазки тракторов и автомобилей, в гидropередачах станков и других машин. Основным их недостатком является сравнительно низкий КПД (у большинства марок).

Производительность шестеренного насоса в минуту определяется по формуле

$$Q = q \cdot n = 2\pi \cdot m^2 \cdot z \cdot b \cdot n,$$

где q — подача насоса за один оборот, $\text{см}^3/\text{об}$; n — частота вращения ведущей шестерни, мин^{-1} ; m — модуль зацепления, см ; z — число зубьев; b — длина зуба шестерни, см .

Учитывая, что в действительности объем впадин несколько больше объема зубьев, то

$$Q = 6,5 \cdot m^2 \cdot z \cdot b \cdot n.$$

Характеристика шестеренного насоса представлена на рисунке 3.23. Резкий перегиб кривой $Q-p$ соответствует началу срабатывания предохранительного клапана.

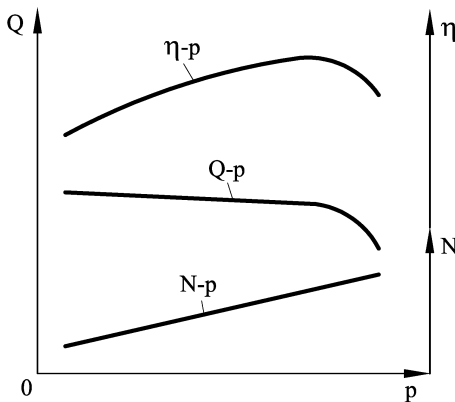


Рис. 3.23

Характеристика шестеренного насоса

Отечественными гидроагрегатными заводами выпускаются в основном шестеренные насосы двух типов, а именно унифицированные (НШ-У) и круглые (НШ-К), левого и правого вращения. Несмотря на различие в конструкции, насосы этих типов унифицированы по креплению и размерам шлицевого привода, вследствие чего насосы обоих ти-

пов взаимозаменяемы. Наибольшее распространение имеют насосы типа НШ-У.

Шестеренные насосы гидравлических систем тракторов и сельскохозяйственных машин по исполнению делятся на три группы (табл. 3.9).

Т а б л и ц а 3.9

Классификация шестеренных насосов по исполнению

Исполнение	Характеристика	
	Номинальное давление на выходе, МПа (кгс/см ²)	Рабочий объем, см ³
2*	14 (140)	10; 32; 50; 67; 100
3	16 (160)	4; 6,3; 10; 25; 32; 40; 50; 71; 100; 160; 250
4	20 (200)	4; 6,3; 10; 25; 32; 40; 50; 71; 100; 160; 250

Примечание. * Насосы исполнения 2 при модернизации и новом проектировании не рекомендуется применять.

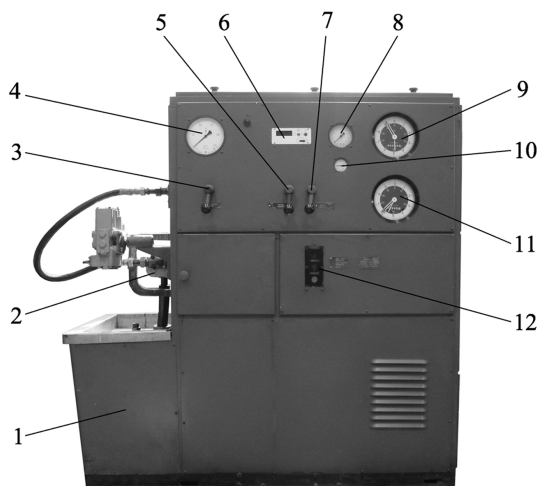
В маркировку шестеренных насосов входит буквенное обозначение, численная величина рабочего объема в см³ на один оборот, номер исполнения, направление вращения ведущего вала и номер ГОСТ. В маркировке насоса индекс К (круглый) не ставится. Если насос левого вращения, ставится буква Л.

Например, насос шестеренный марки НШ-10-3 ГОСТ 8752-90, где Н — насос, Ш — шестеренный, 10 — рабочий объем на один оборот вала, см³, 3 — исполнение (номинальное давление на выходе 16 МПа) с правым направлением вращения ведущего вала. Тот же насос с левым направлением вращения ведущего вала маркируется так: НШ-10-3-Л ГОСТ 8753-90.

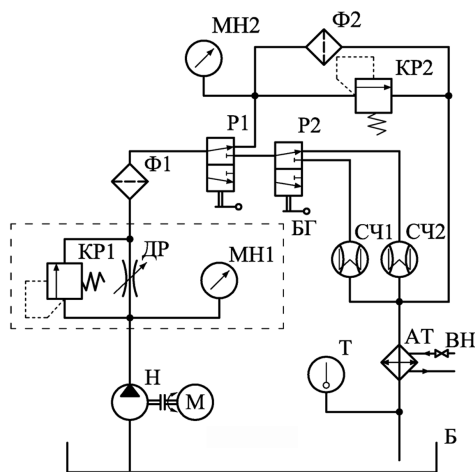
ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Установка для испытания шестеренных насосов представляет собой стенд КИ-4815М (рис. 3.24а), насос марки НШ-32, установленный на монтажную плиту стенда, секундомер.

Стенд КИ-4815М служит в качестве ремонтно-технического оборудования, используемого при техническом обслуживании и ремонте тракторов, сельскохозяйственных машин и их гидроагрегатов. На стенде производится испытание шестеренных насосов НШ-10Е-2, НШ-32-2, НШ-32У-2, НШ-50-2, НШ-50У-2, НШ-67, НШ-100-2 и гидрораспределителей Р-75, Р-150.



a)



6)

Рис. 3.24

Стенд КИ-4815М:

a — внешний вид стенда; *б* — гидравлическая схема: 1 — гидробак; 2 — насос; 3 — дроссель; 4 — манометр МТП-160 кл. 1,5 250 кгс/см²; 5 — кран включения работы счетчика жидкости; 6 — счетчик числа оборотов электродвигателя ЭСО-5; 7 — кран переключения режимов работы счетчиков жидкости; 8 — манометр МОШ 1-100 кл. 2,5 16 кгс/см²; 9 — счетчик жидкости ШЖУ-40С-6; 10 — термометр масла ТПП-2-В; 11 — счетчик жидкости ШЖУ-25М16; 12 — кнопочная станция для управления работой электродвигателя насоса.

Стенд состоит из рамы, облицовки, привода, гидравлической системы и электрооборудования.

Гидравлическая система стенда (рис. 3.24б) состоит из испытываемого насоса Н, гидробака Б, блока гидравлического БГ с дросселем ручного управления ДР, редукционным клапаном КР1 и манометром МН1 (манометр МТП-160 кл. 1,5 250 кгс/см²), сетчатого фильтра Ф1, управляющего крана центробежного фильтра Ф2, двух счетчиков жидкости СЧ1 (счетчик жидкости ШЖУ-25М16) и СЧ2 (счетчик жидкости ШЖУ-40С-6), редукционного клапана КР2, манометра МН2 (манометр МОШ-1-100 кл. 2,5 16 кгс/см²), охлаждающего устройства АТ с термометром Т (термометр ТПП-2-В). Также стенд имеет электронный счетчик числа оборотов электродвигателя ЭСО-5.

На стенде устанавливается испытываемый насос и соединяется с валом привода стенда. Из гидробака насос забирает рабочую жидкость по всасывающему трубопроводу. Нагнетательная полость насоса гибким шлангом высокого давления присоединяется к штуцеру стенда на вход в блок гидравлический. Манометр МН1 показывает давление соответствующее степени открытия дросселя. Рабочая жидкость проходит очистку в фильтре Ф1. Краном, имеющим два переключателя Р1 и Р2, рабочая жидкость может быть направлена либо на тонкую очистку центробежным фильтром Ф2, либо на замер через один из двух счетчиков СЧ1, СЧ2. Счетчик СЧ1 предназначен для измерения расходов 7–40 л/мин, а СЧ2 — 40–120 л/мин.

Редукционный клапан КР2 обеспечивает режим работы центробежного фильтра, контролируемый по манометру МН2. Рабочая жидкость после прохождения счетчиков охлаждается в охлаждающем устройстве АТ. Температура рабочей жидкости измеряется термометром Т.

В процессе испытаний шестеренного насоса проводятся следующие операции:

- проверка работы насоса без нагрузки при полностью открытом дросселе;
- проверка работы насоса при постоянно увеличиваемой нагрузке до номинального давления;
- проверка герметичности уплотнений насоса при кратковременных нагрузках;
- определение объемной подачи насоса за один оборот вала при увеличении давления развиваемого насосом до номинального;
- определение подачи насоса при заданном давлении.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1. Установить испытуемый насос на стенд.
2. Подключить охлаждающую воду от водопровода.
3. Подключить стенд к электросети.

4. Рукоятку дросселя ДР поставить в положение «открыто», рукоятку Р1 счетчиков СЧ — в положение «выключено». При таком положении вся рабочая жидкость проходит через центробежный фильтр Ф2.

5. Нажать кнопку 12 включения электродвигателя стенда, соответствующую направлению вращения насоса: «правого вращения» или «левого вращения». При указанном положении рукояток стенду необходимо поработать 3...4 мин, что соответствует работе насоса без нагрузки.

При наличии утечек отключить стенд от сети. При отсутствии утечек без нагрузки проверить их наличие, при плавно изменяющейся нагрузке до номинального давления насоса. Нагрузка производится дросселем ДР гидравлического блока.

При отсутствии утечек при плавно изменяющемся нагружении проверить их наличие при кратковременном нагружении 5...6 раз в течение 0,5 мин давлением $1,25 p_{\text{ном}}$.

6. Определить объемную подачу насоса за один оборот вала q и подачу насоса Q , для чего выполнить следующее:

6.1. Поставить рукоятку счетчиков в положение «7–40 л/мин» при испытании насосов НШ-10Е, НШ-32 и в положение «40–120 л/мин» при испытании НШ-50Е, НШ-67 и НШ-100.

6.2. При помощи рукоятки дросселя ДР гидравлического блока производить ступенчатое нагружение насоса до $p = 1,25 p_{\text{ном}}$. Перед нагружением повернуть рукоятку Р1 счетчиков СЧ в положение «счетчик включен». При этом весь поток жидкости пройдет через соответствующий счетчик жидкости.

6.3. Включить питание электронного счетчика оборотов.

6.4. Обнулить показания электронного счетчика оборотов.

6.5. Выбрать на шкале счетчика жидкости СЧ два деления, соответствующие началу и окончанию отсчета.

6.6. При прохождении стрелки счетчика через деление, принятое за начало отсчета, включить электронный счетчик оборотов и одновременно секундомер, при прохождении стрелки через деление, соответствующее окончанию отсчета, их отключить.

6.7. При каждом нагружении производить запись измеряемых на стенде параметров: p — давление, W — объем отсчета, n — количество оборотов, t — время.

6.8. При следующем нагружении повторить операции по пп. 6.4–6.7.

7. По окончании испытаний насоса обесточить стенд.

8. По зависимости η_V-p из каталога для насосов типа НШ для каждого опытного значения давления снять соответствующее значение КПД насоса.

9. Провести обработку опытных данных.

ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

1. Рассчитать подачу за один оборот:

$$q = \frac{W}{n}.$$

2. Вычислить подачу насоса:

$$Q = \frac{W}{t}.$$

3. Определить мощность на валу насоса:

$$N = \frac{Q \cdot p}{\eta}.$$

4. Построить характеристики насоса: $Q-p$, $N-p$.

5. Сделать выводы по работе.

Т а б л и ц а 3.10

Таблица опытных данных

Марка насоса ...

Наименование показателя	Обозначение	Единица измерения	Опыт				
			1	2	3	4	5
1. Показания манометра высокого давления	p	кгс/см ²					
		МПа					
2. Объем отсчета	W	л (дм ³)					
		см ³					
3. Количество оборотов	n	об					
4. Время опыта	t	с					
5. Подача за один оборот	$q = \frac{W}{n}$	см ³ /об					
6. Подача насоса	$Q = \frac{W}{t}$	дм ³ /с					
		м ³ /с					

Продолжение табл. 3.10

Наименование показателя	Обозначение	Единица измерения	Опыт				
			1	2	3	4	5
7. КПД насоса	η	%					
8. Мощность на валу насоса	$N = \frac{Q \cdot p}{\eta}$	Вт					

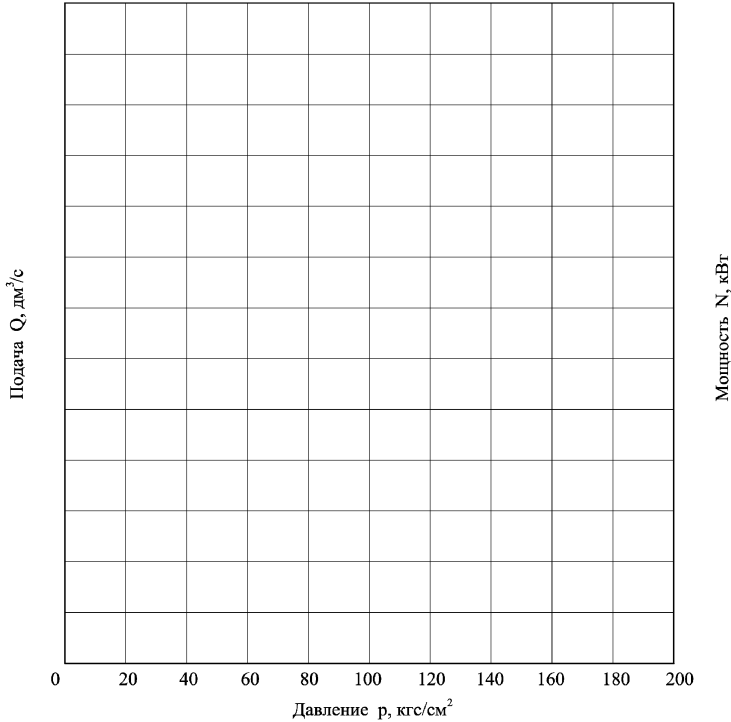


Рис. 3.25

Характеристики шестеренного насоса Q - p , N - p

Контрольные вопросы

1. В чем принципиальное отличие объемных насосов от динамических?
2. Как определяется средняя производительность объемных насосов?
3. Расскажите о конструкции и принципе действия шестеренного насоса.

4. Как определяется производительность шестеренного насоса?
5. Какой вид имеет характеристика шестеренного насоса?
6. В чем заключается методика испытания шестеренных насосов?
7. Как маркируют шестеренные насосы?
8. Условия запуска объемных насосов.
9. Назовите элементы, входящие в стенд КИ-4815М, и их назначение.
10. Объясните принцип работы стенда КИ-4815М по гидравлической схеме.

**ПРИМЕРЫ
ТЕСТОВЫХ ЗАДАНИЙ
ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ
«ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ МАШИНЫ»**

КАРТОЧКА РУБЕЖНОГО КОНТРОЛЯ

ВАРИАНТ № 1

№ п/п	Вопросы	Ответы
1	Как изменится напор H насосной проектируемой станции, если диаметр d трубопровода, по которому перекачивается жидкость, будет уменьшен при сохранении прежней подачи?	1. Увеличится $H = h_{\text{ст}} + h_w; \quad h = f\left(\frac{1}{d^3}\right).$ 2. Уменьшится $H = h_{\text{ст}} + h_w; \quad h_{\text{ст}} = f(d).$ 3. Останется прежним $H = \frac{p_m + p_v}{\gamma}, \quad d \text{ не влияет.}$ 4. Уменьшится $H = h + h_w; \quad h_w = f(d^2).$ 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
2	На насосе, перекачивающем воду, показание манометра 1320 кПа и вакуумметра 60 кПа. Определите на основании этих показаний значение напора насоса, $\gamma_v = 9,81 \text{ кН/м}^3$.	1. 1,4 м. 2. 14 м. 3. 140,7 м. 4. 1400 м. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
3	Анализируя формулу напора центробежного насоса, укажите, как влияет диаметр рабочего колеса D_k на развиваемый насосом напор при постоянной частоте вращения рабочего колеса.	1. $H = \text{const.}$ 2. $H = kD_k$. 3. $H = kD_k^2$. 4. $H = kD_k^3$. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
4	Как зависит мощность центробежного насоса от частоты вращения рабочего колеса?	1. $N = \text{const.}$ 2. $N = kn$. 3. $N = kn^2$. 4. $N = kn^3$. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.

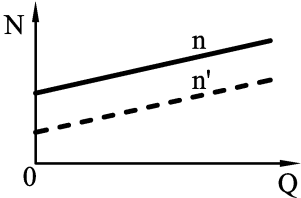
Продолжение табл.

№ п/п	Вопросы	Ответы
5	Как зависят напор и мощность центробежного насоса в зоне устойчивой работы от его подачи при постоянной частоте вращения рабочего колеса?	1. С увеличением Q увеличивается H и уменьшается N. 2. С увеличением Q уменьшается H и увеличивается N. 3. С увеличением Q напор и мощность уменьшаются. 4. С увеличением Q напор и мощность не зависят от подачи. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
6	Как влияет диаметр трубопровода на его характеристику?	1. Чем больше d, тем положе характеристика. 2. Чем больше d, тем круче характеристика трубопровода. 3. Диаметр трубопровода на крутизну его характеристики не влияет. 4. Диаметр трубопровода и характеристика независимы друг от друга. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
7	Как пускаются в ход центробежный и осевой насосы — при закрытой или открытой задвижке?	1. Осевой — при закрытой задвижке, центробежный — при открытой задвижке. 2. Осевой — при открытой задвижке, центробежный — при закрытой задвижке. 3. Оба насоса — при закрытой задвижке. 4. Оба насоса — при открытой задвижке. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
8	Как влияет диаметр трубопровода на эффективность подачи при параллельном включении насосов?	1. Расход жидкости увеличивается при увеличении диаметра трубопровода. 2. Расход жидкости уменьшается при увеличении диаметра трубопровода. 3. Диаметр трубопровода на расход не влияет. 4. Квадратичная зависимость. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
9	Каково значение вакуумметрического давления во всасывающем патрубке насоса,	1. 6 кПа. 2. 60 кПа. 3. 0,94 кПа. 4. 1,06 кПа.

Продолжение табл.

№ п/п	Вопросы	Ответы
9	перекачивающего жидкость с удельным весом 8 кН/м^3 , если вакуумметрическая высота всасывания равна $7,5 \text{ м}$?	5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
10	Как влияет длина всасывающей трубы l на вакуумметрическую высоту всасывания $H_{\text{вак}}$?	1. Длина всасывающей трубы не влияет на $H_{\text{вак}} = \frac{p_{\text{вак}}}{\gamma}$. 2. $H_{\text{вак}} = h_s + \frac{v^2}{2g} + h_{ws}$ увеличивается с увеличением l, так как h_{ws} возрастает. 3. $H_{\text{вак}} = h_s + \frac{v^2}{2g} + h_{ws}$ уменьшается с увеличением l, так как h_{ws} уменьшается. 4. Между длиной всасывающей трубы и вакуумметрической высотой квадратичная зависимость. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.

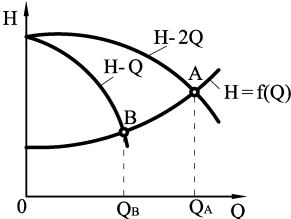
ВАРИАНТ № 2

№ п/п	Вопросы	Ответы
1	Жидкость перекачивается из одного открытого резервуара в другой на высоту 120 м. Потери напора в трубопроводе — 20 м. Чему равен потребный напор, и каким он будет, если расход трубопровода будет увеличен вдвое?	1. 140 и 200 м. 2. 120 и 160 м. 3. 120 и 130 м. 4. 100 и 120 м. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
2	На насосе, перекачивающем масло с удельным весом 8 кН/м^3 , показание манометра 1560 кПа и вакуумметра 40 кПа. Определите на основании этих показаний значение напора, развиваемого насосом.	1. $H = 200 \text{ м}$. 2. $H = 20 \text{ м}$. 3. $H = 19,5 \text{ м}$. 4. $H = 1,95 \text{ м}$. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
3	Анализируя формулу напора центробежного насоса, укажите, как зависит напор насоса от диаметра рабочего колеса при постоянной частоте вращения рабочего колеса.	1. $H = kD^2$. 2. $H = kD$. 3. $H = kD^3$. 4. $H = \text{const}$, не зависит от D . 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
4	Частота вращения рабочего колеса центробежного насоса, работающего на данный трубопровод, уменьшена. Как изменяются при этом подача насоса и его напор? 	1. $Q' = Q \frac{n'}{n}$; $H' = H \left(\frac{n'}{n} \right)^2$. 2. $Q' = Q \frac{n}{n'}$; $H' = H \left(\frac{n}{n'} \right)^2$. 3. Q и H не зависят от n . 4. $Q' = Q \frac{n'}{n}$; $H' = H \left(\frac{n}{n'} \right)^2$. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.

Продолжение табл.

№ п/п	Вопросы	Ответы
5	Частота вращения рабочего колеса центробежного насоса, работающего на данный трубопровод, уменьшена. Как изменяются при этом подача насоса и его мощность?	1. $Q' = Q \frac{n'}{n}$; $N' = N \frac{n'}{n}$. 2. $Q' = Q \frac{n}{n'}$; $N' = N \left(\frac{n'}{n}\right)^2$. 3. $Q' = Q \frac{n'}{n}$; $N' = N \frac{n}{n'}$. 4. $Q' = Q \frac{n'}{n}$; $N' = N \left(\frac{n'}{n}\right)^3$. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
6	Как влияет длина трубопровода на его характеристику (при неизменном диаметре)?	1. Чем больше длина, тем положе характеристика. 2. Чем больше длина, тем характеристика круче. 3. Характеристика трубопровода не зависит от его длины. 4. Чем меньше длина, тем круче характеристика. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
7	Укажите все способы, которыми можно уменьшить (и вообще регулировать) подачу объемных насосов.	1. Перепускным клапаном, создавая искусственную утечку жидкости. 2. Изменение объема рабочей камеры насоса. 3. Изменением эксцентриситета и реверсированием. 4. Все вышеперечисленные способы. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
8	Два одинаковых центробежных насоса включаются в параллельную работу на общий трубопровод диаметром 125 мм.	1. Расход увеличивается в 3 раза. 2. Расход увеличивается в 2 раза.

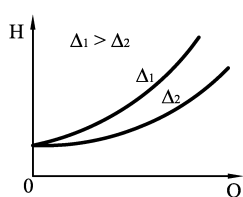
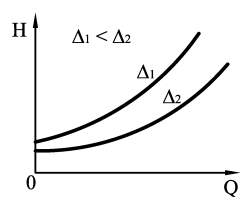
Продолжение табл.

№ п/п	Вопросы	Ответы
8	Как изменяется расход при включении второго насоса? 	3. Расход не изменяется. 4. Расход уменьшится в 2 раза. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
9	Показание вакуумметра, подключенного к всасывающему патрубку насоса, перекачивающего жидкость с удельным весом $7,60 \text{ кН/м}^3$, равно $15,2 \text{ кПа}$. Чему равна вакуумметрическая высота всасывания?	1. 2 м. 2. 0,2 м. 3. 11,5 м. 4. 0,5 м. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
10	Как зависит вакуумметрическая высота всасывания $H_{\text{вак}}$ от скорости во всасывающей трубе?	1. $H_{\text{вак}} = \frac{p_{\text{вак}}}{\gamma}$ не зависит от скорости v. 2. $H_{\text{вак}} = h_s + \frac{v^2}{2g} + h_{ws}$ увеличивается с увеличением v, так как растут потери напора. 3. $H_{\text{вак}} = h_s + \frac{v^2}{2g} + h_{ws}$ уменьшается с увеличением v, так как потери напора h_{ws} уменьшаются. 4. Растет в квадратичной зависимости. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.

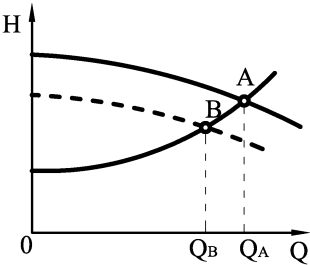
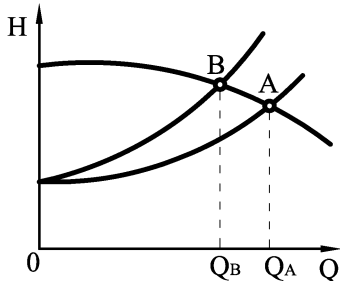
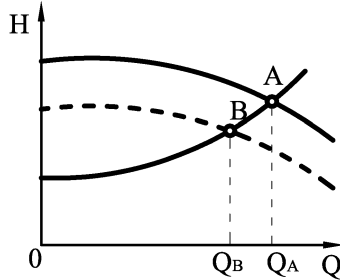
ВАРИАНТ № 3

№ п/п	Вопросы	Ответы
1	Жидкость перекачивается по трубопроводу из одного открытого резервуара в другой на высоту 140 м. Потеря напора равна 10 м. Определить напор насоса и указать, как он изменится, если подача будет увеличена в три раза.	1. 150 и 180 м. 2. 140 и 420 м. 3. 150 и 230 м. 4. 130 и 160 м. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
2	На работающей насосной установке, перекачивающей жидкость с удельным весом $7,50 \text{ кН/м}^3$, сняты показания манометра $p_m = 1430 \text{ кПа}$ и вакуумметра $p_{\text{вак}} = 70 \text{ кПа}$. Определить напор насоса.	1. 150 м. 2. 200 м. 3. 210 м. 4. 184 м. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
3	Как зависит напор центробежного насоса от уменьшения (обточки) рабочего колеса при постоянной частоте вращения рабочего колеса?	1. Уменьшается пропорционально уменьшению диаметра. 2. Увеличивается пропорционально уменьшению диаметра. 3. Уменьшается пропорционально квадрату изменения диаметра. 4. Не зависит от диаметра. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
4	Укажите, как изменяется мощность центробежного насоса при уменьшении частоты вращения рабочего колеса, полагая, что КПД его остается неизменным?	1. $n > n' \quad N' = N \left(\frac{n'}{n} \right)^3$. 2. $n > n' \quad N' = N \left(\frac{n}{n'} \right)^3$. 3. $n > n' \quad N' = N \left(\frac{n'}{n} \right)^2$.

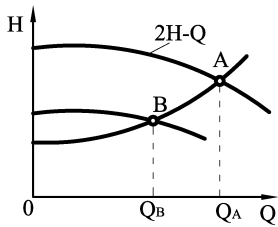
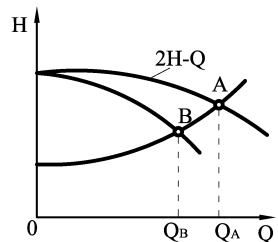
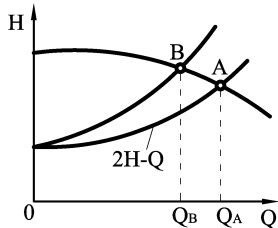
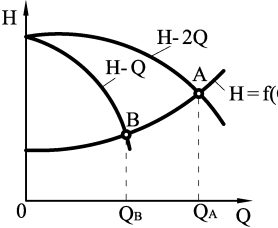
Продолжение табл.

№ п/п	Вопросы	Ответы
4	Укажите, как изменяется мощность центробежного насоса при уменьшении частоты вращения рабочего колеса, полагая, что КПД его остается неизменным?	4. $n > n'$ $N' = N \frac{n'}{n}$. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
5	Как пускаются в ход центробежный и осевой насосы — при закрытой или открытой задвижке?	1. Осевой — при открытой, центробежный — при закрытой. 2. Оба при открытой. 3. Оба при закрытой. 4. Осевой — при закрытой, центробежный — при открытой. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
6	Как влияет шероховатость внутренней поверхности трубопровода на его характеристику (становится ли с увеличением шероховатости характеристика круче, положе или остается неизменной)?	1. Шероховатость не влияет на характеристику $H = f(Q)$. 2. Характеристика становится круче.  3. Характеристика становится положе.  4. Характеристика становится положе, но в отдельных случаях. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.

Продолжение табл.

№ п/п	Вопросы	Ответы
7	Какими способами может быть уменьшена подача центробежного насоса и как тот или иной способ влияет на характеристику насоса или трубопровода?	1. Уменьшением частоты вращения рабочего колеса.  2. Дросселированием задвижкой.  3. Обточкой рабочего колеса.  4. Все перечисленные способы уменьшают подачу. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.

Продолжение табл.

№ п/п	Вопросы	Ответы
8	На каком графике правильно показана последовательная работа двух насосов на общий трубопровод?	1.  2.  3.  4.  5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.

Продолжение табл.

№ п/п	Вопросы	Ответы
9	Насос перекачивает жидкость с удельным весом $7,5 \text{ кН/м}^3$. Показание вакуумметра $22,5 \text{ кПа}$. Чему равна вакуумметрическая высота всасывания?	1. 0,3 м. 2. 1,68 м. 3. 3 м. 4. 15 м. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
10	Диаметр всасывающей трубы насоса увеличен. Укажите, как это отразилось на вакуумметрической высоте всасывания насоса.	1. $H_{\text{вак}} = \frac{p_{\text{вак}}}{\gamma}$ не изменится. 2. $H_{\text{вак}} = h_s + \frac{v^2}{2g} + h_{ws}$ увеличится, так как возрастут h_{ws}. 3. $H_{\text{вак}} = h_s + \frac{v^2}{2g} + h_{ws}$ уменьшится. 4. $H_{\text{вак}} = h_{ws}$ увеличится. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.

Часть 4

ВОДОСНАБЖЕНИЕ

Лабораторная работа № 4.1

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ВОДОСТРУЙНОЙ ВОДОПОДЪЕМНОЙ УСТАНОВКИ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучить теоретические сведения по теме лабораторной работы.
2. Исследовать эффект увеличения высоты всасывания при последовательной работе струйного аппарата и центробежного насоса, сделать выводы по работе.

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

Водоструйные водоподъемные установки применяют для откачки воды из глубоких колодцев, котлованов, траншей. В сельском хозяйстве используются для подъема воды из шахтных и трубчатых колодцев с диаметром обсадной трубы 50...200 мм.

Водоструйная установка состоит из струйного аппарата (эжектора), опущенного под динамический уровень воды, напорного и водоподъемного трубопроводов, центробежного насоса с приводом от электродвигателя, расположенных на поверхности скважины (рис. 4.1).

Совместная работа центробежного насоса со струйным аппаратом позволяет поднимать воду с глубины до 50 м, в то время как высота всасывания насоса не превышает 6...7 м. Это обусловлено способностью струйного аппарата обеспечивать необходимое давление жидкости перед входом ее в насос, исключаящее возникновение кавитации.

Принцип действия водоструйной установки заключается в следующем: подаваемая центробежным насосом по напорному трубопроводу вода, проходя с большой скоростью через сопло струйного аппарата, создает разрежение,

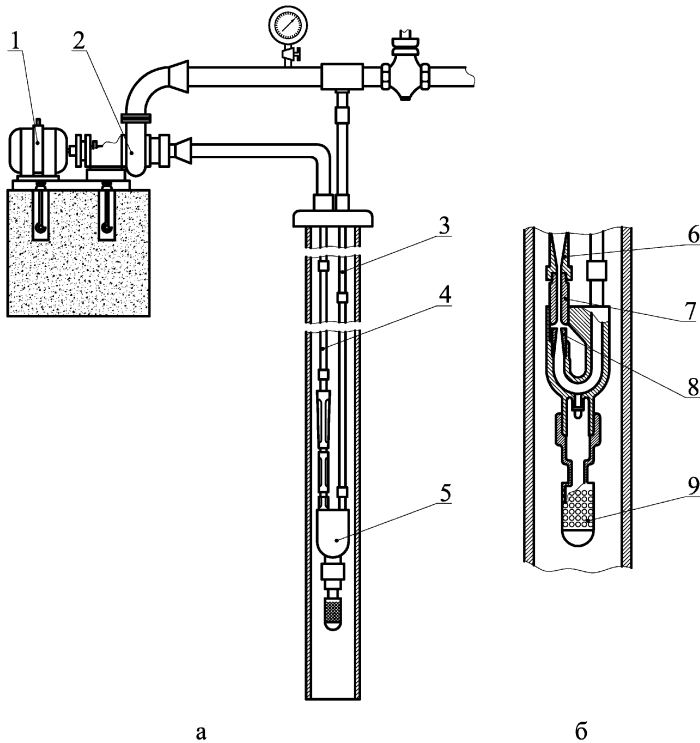


Рис. 4.1

Схема водоструйной водоподъемной установки:

- а* — водоструйная установка; *б* — струйный аппарат: 1 — электродвигатель; 2 — насос; 3 — напорный трубопровод; 4 — водоподъемный трубопровод; 5 — эжектор (струйный аппарат); 6 — диффузор; 7 — камера смешения; 8 — сопло; 9 — фильтр.

в результате чего происходит всасывание воды из водисточника через фильтр в камеру смешения. В диффузоре скорость воды понижается благодаря расширению потока, а давление соответственно увеличивается, и вода по водоподъемной трубе поднимается на высоту, с которой центробежный насос может забирать ее, не работая в кавитационном режиме. Пройдя через насос и получив соответствующий напор, часть воды снова попадает по напорному трубопроводу к струйному аппарату, а часть идет к потребителю. Таким образом, процесс подъема воды идет непрерывно.

Существует несколько схем водоструйных установок: с промежуточным баком и двумя насосами; с промежуточным баком и одним насосом; с одним насосом без бака; со специальным двухпоточным насосом (рис. 4.2).

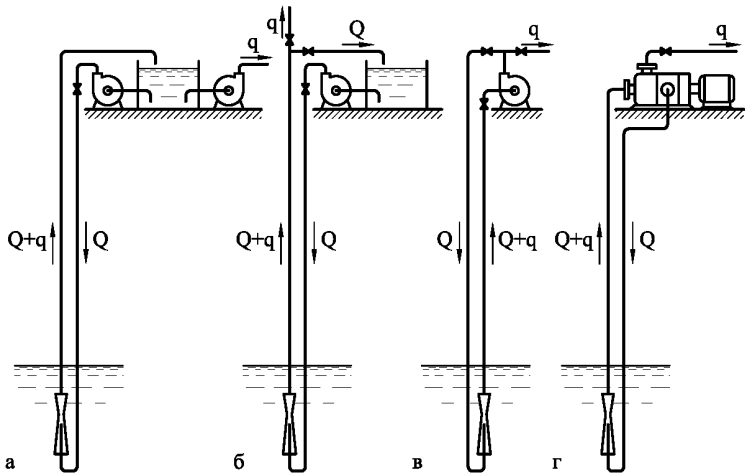


Рис. 4.2

Схемы водоструйных установок:

- а* — с промежуточным баком и двумя насосами;
б — с промежуточным баком и одним насосом; *в* — с одним насосом без бака;
г — со специальным двухпоточным насосом.

Водоструйные водоподъемники позволяют поднимать воду с глубины до 40...50 м. Для подъема с большей глубины в конструкции водоподъемника применяется двухпоточный центробежный насос с промежуточным отбором жидкости.

Существенный недостаток водоструйной водоподъемной установки — низкий КПД в пределах 20–30%.

В зависимости от конструкции струйного аппарата и взаимного расположения напорного и водоподъемного трубопроводов водоструйные установки разделяются на три типа.

1. Двухлинейные с параллельным расположением трубопроводов. Эти установки просты в монтаже и применяются главным образом для подъема воды из шахтных колодцев. Недостаток — неполное использование сечения колодца.

2. Двухлинейные с центральным (концентрическим) расположением труб, когда водоподъемный трубопровод проходит внутри напорного. По сравнению с первым типом эти установки более компактны и могут применяться в трубчатых колодцах меньшего сечения. Недостаток — сложность монтажа и повышенная металлоемкость.

3. Однолинейные установки, в которых напорным трубопроводом служит колонна обсадных труб колодца. Отличаются наименьшей металлоемкостью и допускают водоподъем из трубчатых колодцев диаметром 50–75 мм.

Гидравлический расчет водоструйной установки заключается в определении режима работы, при котором совместно работающий насос и струйный аппарат взаимно удовлетворяют друг друга по расходам и напорам и обеспечивают устойчивый режим работы установки при подаче потребителю расчетного расхода.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Экспериментальная установка (рис. 4.3) состоит из центробежного насоса с электродвигателем, струйного аппарата (эжектора), напорного трубопровода, подводящего рабочий расход воды, водоподъемного трубопровода, по которому вода подводится к всасывающему патрубку насоса, ротаметров, приемного бака, обсадной трубы, изготовленной из стекла и закрепленной на опорной раме сварной конструкции, трубопроводов для подвода и слива воды, кранов, манометров и мановакуумметра.

Вода от насоса подается по трубопроводу с рабочим расходом Q_p , измеряемым ротаметром, в струйный аппарат, далее по трубопроводу поступает во всасывающую линию насоса. Таким образом, вода непрерывно циркулирует в замкнутой цепи: насос — струйный аппарат. Часть расхода водоподъемника Q_o , называемая полезным расходом и измеряемая вторым ротаметром, поступает в приемный бак, откуда сливается в обсадную трубу.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1. Залить воду в обсадную трубу 14, открыв кран 4 (рис. 4.3).

2. Открыть краны 3, 9 и 13 (остальные краны должны быть закрыты) и включить электродвигатель насоса.

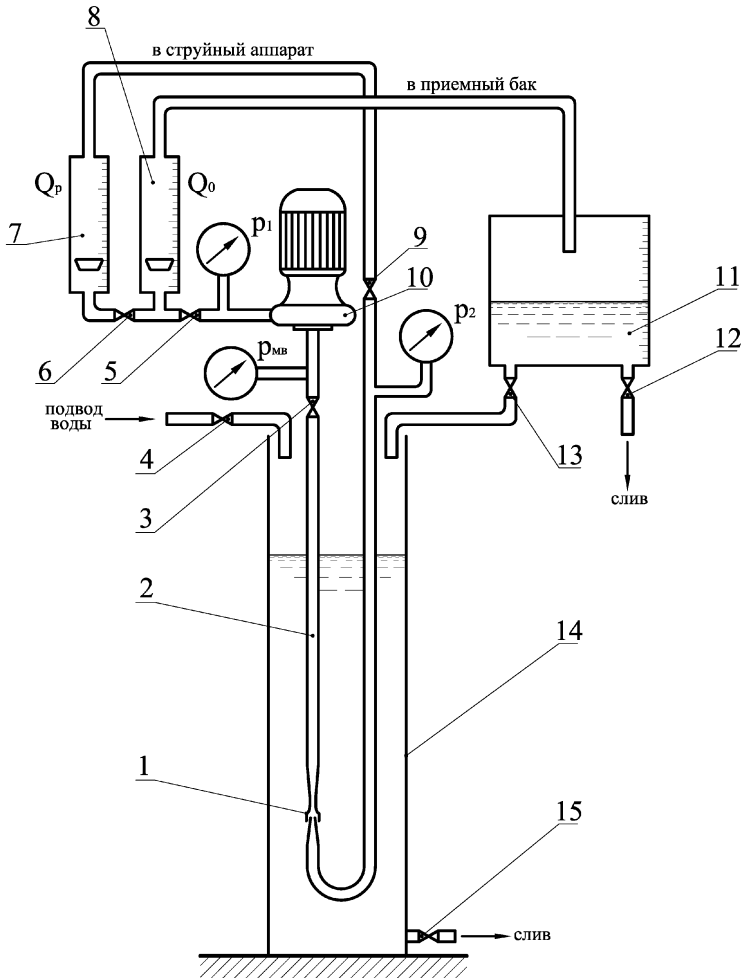


Рис. 4.3

Схема водоструйной установки:

- 1 — струйный аппарат; 2 — водоподъемный трубопровод;
 3 — вентиль всасывающего трубопровода; 4 — вентиль подводящего трубопровода;
 5, 6 — вентили ротаметров; 7 — ротаметр измерения рабочего расхода;
 8 — ротаметр измерения полезного расхода; 9 — вентиль напорного трубопровода;
 10 — насос; 11 — бак; 12 — вентиль слива воды из бака;
 13 — вентиль возврата воды в обсадную трубу; 14 — обсадная труба;
 15 — вентиль слива воды из установки.

3. При помощи кранов 5, 6 отрегулировать расходы: рабочий Q_p и полезный Q_o в соотношении 1:1.

4. Записать показания: ротаметров Q_p , Q_o , манометров p_1 , p_2 , мановакуумметра $p_{мв}$.

5. Отключить струйный аппарат, перекрыв вентиль 9.

6. Снять показания: ротаметра, замеряющего полезный расход Q_o , манометра на напорном трубопроводе насоса p_1 , мановакуумметра $p_{мв}$.

ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

1. Определить напор насоса:

$$H = \frac{p_1 \pm p_{мв}}{\gamma}.$$

2. Рассчитать КПД водоструйной установки:

$$\eta = \frac{N_{п}}{N} = \frac{\gamma \left(H(Q_o + Q_p) - \frac{p_2}{\gamma} Q_p \right)}{\gamma H(Q_o + Q_p)} = \frac{H(Q_o + Q_p) - \frac{p_2}{\gamma} Q_p}{H(Q_o + Q_p)},$$

где $N_{п}$ — полезная мощность, Вт; N — потребляемая мощность, Вт; H — напор насоса, м.

3. Сравнить показатели работы насоса (напор и расход) при совместной работе со струйным аппаратом и без него.

4. Сделать выводы по работе.

Т а б л и ц а 4.1

Таблица опытных данных

Наименование показателя	Обозначение	Единица измерения	Опыт	
			1	2
1. Давление на входе в насос	$p_{мв}$	кгс/см ²		
		Па		
2. Давление на выходе из насоса	p_1	кгс/см ²		
		Па		
3. Давление водоструйного аппарата	p_2	кгс/см ²		
		Па		
4. Расход потребителя	Q_o	см ³ /с		
5. Расход водоструйного аппарата	Q_p	см ³ /с		

Продолжение табл. 4.1

Наименование показателя	Обозначение	Единица измерения	Опыт	
			1	2
6. Напор насоса	$H = \frac{p_1 \pm p_{\text{мв}}}{\gamma}$	м		
7. КПД установки	$\eta = \frac{H(Q_o + Q_p) - \frac{p_2}{\gamma} Q_p}{H(Q_o + Q_p)}$	%		

Контрольные вопросы

1. Расскажите о назначении водоструйных водоподъемных установок и существующих их схемах.

2. Опишите конструкцию и принцип действия водоструйной водоподъемной установки. Какие существуют конструкции струйного аппарата?

3. С какой глубины можно поднимать воду с помощью этой установки?

4. Чему равен КПД водоструйной водоподъемной установки?

5. Перечислите достоинства этой установки.

6. Как определить напор водоструйной водоподъемной установки?

7. Каковы недостатки водоструйной водоподъемной установки?

8. В чем заключается гидравлический расчет водоструйной водоподъемной установки?

9. Какой тип насоса используется в конструкции водоподъемной установки?

10. Что необходимо сделать, прежде чем запустить в действие водоструйную водоподъемную установку?

Лабораторная работа № 4.2

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ВОЗДУШНОГО ВОДОПОДЪЕМНИКА (ЭРЛИФТА)

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучить теоретические сведения по теме лабораторной работы.
2. Определить рабочие параметры эрлифта, сделать выводы по работе.

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

Воздушные водоподъемники (эрлифты) применяются для подъема воды из глубоких скважин при пробных откачках для осветления воды в трубчатых колодцах после бурения, пастбищного водоснабжения, в случаях необходимости аэрации воды при содержании в ней растворенных газов, например, сероводорода и др.

Принцип действия эрлифта основан на законе сообщающихся сосудов — использовании разности сил давления столбов воды и водовоздушной смеси разной плотности (рис. 4.4).

$$\frac{\gamma_1}{\gamma_2} = \frac{H-h}{H},$$

где γ_1 — удельный вес воды; γ_2 — удельный вес водовоздушной эмульсии; $(H-h)$ — расстояние от форсунки до динамического уровня воды в скважине; h — расстояние от динамического уровня до устья водоподъемной трубы; H — расстояние от форсунки до устья водоподъемной трубы.

До образования водовоздушной эмульсии вода в водоподъемной трубе и в скважине установится на одном уровне (статический уровень). Сжатый воздух от компрессора через

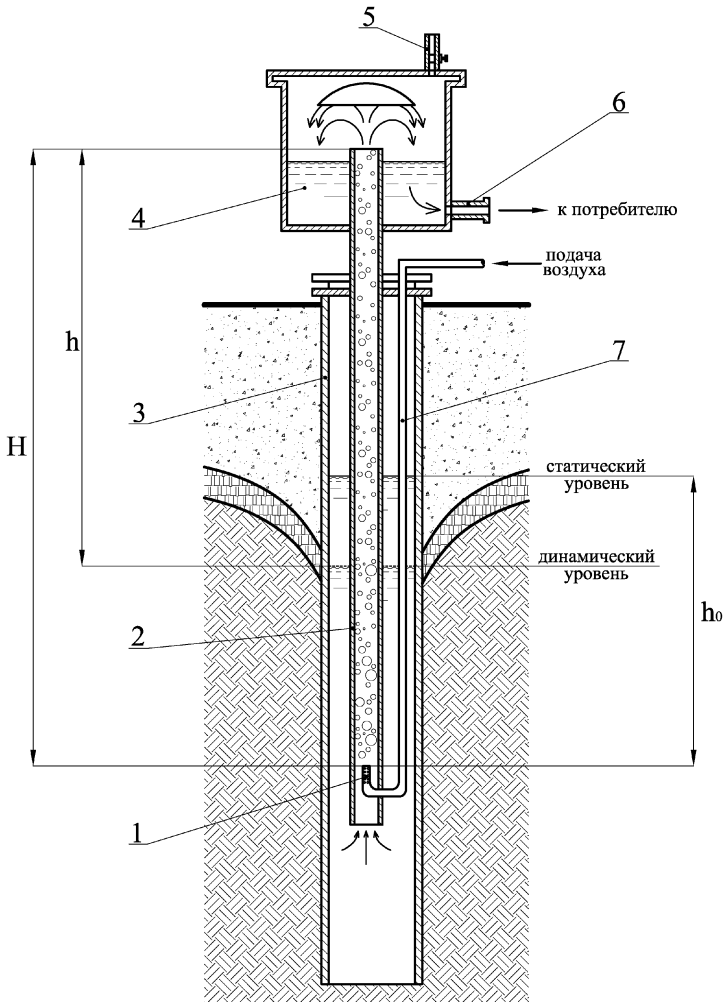


Рис. 4.4

Схема эрлифта:

1 — форсунка; 2 — водоподъемная труба; 3 — обсадная труба; 4 — резервуар;
5 — патрубок для выхода воздуха; 6 — сливной патрубок; 7 — воздушная труба.

маслоотделитель и ресивер поступает в форсунку, где, смешиваясь с водой, образует водовоздушную смесь (эмульсию). В силу того, что плотность водовоздушной смеси меньше плотности воды, смесь начинает двигаться

по водоподъемной трубе. В результате этого вода начинает заходить в трубу и тут же превращается в эмульсию, столб эмульсии растет, и, когда уровень ее достигает устья, она переливается в приемный бачок (сепаратор). В сепараторе при помощи отражателя вода отделяется от воздуха и по сливному патрубку поступает в сборный резервуар, а воздух через специальный патрубок выходит в атмосферу.

В зависимости от расположения воздушной трубы различают две системы эрлифтов: центральную (воздушная труба размещена внутри водоподъемной) и параллельную (воздушная труба находится рядом с водоподъемной). Эрлифты центральной системы имеют меньшие габариты; в качестве водоподъемной трубы могут быть использованы обсадные трубы скважины.

При работе эрлифта необходимо, чтобы воздуховод и водоподъемная труба были погружены достаточно глубоко под уровень воды (динамический уровень) в скважине, это необходимо для уравнивания столба эмульсии и перемещения его вверх. Существенное влияние на работу и КПД эрлифта оказывает коэффициент погружения k , определяемый как отношение глубины погружения форсунки H к высоте подъема воды h :

$$k = \frac{H}{h}.$$

При недостаточной глубине погружения форсунки в связи с низким уровнем воды в скважине эмульсия не в состоянии преодолеть путь от места ее образования до сепаратора. Наилучшие условия для работы эрлифта создаются при значениях коэффициента погружения от 1,7 до 3. При значениях коэффициента погружения меньше 1,7 падает общий КПД эрлифта, а при значениях больше 3 возрастают эксплуатационные затраты. Наивыгоднейшее значение коэффициента погружения k выбирают на основании технико-экономических расчетов.

Размеры эрлифта, подачу и давление компрессора определяют расчетом.

На основании проведенных опытов Я. С. Суреньянц дает рекомендации для выбора коэффициента погружения k и КПД эрлифта $\eta_э$ в зависимости от высоты подъема воды h (табл. 4.2).

Т а б л и ц а 4.2

Значения коэффициента погружения и КПД эрлифта

$h, \text{ м}$	до 15	15...30	30...60	60...90	90...100
k	3...2,5	2,5...2,2	2,2...2	2...1,75	1,75...1,65
η_0	0,59...0,57	0,57...0,54	0,54...0,5	0,5...0,41	0,41...0,4

Необходимый расход воздуха находят по так называемому удельному расходу, т. е. объему воздуха, необходимому для подъема 1 м^3 воды:

$$W_0 = \frac{h}{23\eta_0 \lg \frac{h(k-1)+10}{10}}, \text{ м}^3,$$

где η_0 — гидравлический КПД эрлифта, по эмпирической формуле Я. С. Суреньянца $\eta_0 = \frac{(k-1)^{0,85}}{1,05k}$, или из приведенных выше рекомендаций (табл. 4.2).

Общий расход воздуха при подъеме воды из скважины подсчитывают по формуле

$$W_K = \frac{1,2QW_0}{60}, \text{ м}^3/\text{мин},$$

где Q — расход (подача) воды, $\text{м}^3/\text{ч}$.

Пусковое давление компрессора p_n определяют по формуле

$$p_n = 0,01(H - h_0 + 2), \text{ МПа},$$

где h_0 — глубина статического горизонта воды в скважине, м.

Рабочее давление компрессора:

$$p_p = 0,01\left(H - h + \sum h_b\right), \text{ МПа},$$

где $\sum h_b$ — сумма потерь напора в воздуховоде от компрессора до форсунки.

Для смягчения пульсации расхода воздуха, поступающего из компрессора, а также для сепарации из воздуха паров воды и масла на напорной воздушной линии устанавливают специальный резервуар — ресивер, объем которого зависит от производительности компрессора:

$$W_{\text{рез}} = (0,1...0,2)W_K.$$

Диаметр водоподъемных труб определяют в зависимости от скоростей движения смеси у форсунки $v_{\text{ф}} = 2,5 \dots 3$ м/с и на изливе $v_{\text{и}} = 8 \dots 10$ м/с. Соответственно, диаметр водоподъемной трубы эрлифта параллельной системы можно определить по следующим формулам:

- для сечения на уровне излива

$$d_{\text{и}} = \sqrt{\frac{Q}{0,785v_{\text{и}}}(1 + W_0)}, \text{ м},$$

- для сечения над форсункой

$$d_{\text{ф}} = \sqrt{\frac{Q}{0,785v_{\text{ф}}}\left[1 + \frac{10W_0}{h(K-1)+10}\right]}, \text{ м}.$$

Диаметр воздушной трубы устанавливают по скорости движения сжатого воздуха в пределах $5 \dots 10$ м/с или по расходу воздуха (таблица 4.3).

Т а б л и ц а 4.3

Значения диаметров воздушной трубы

Расход воздуха, м ³ /ч	10... 30	30... 60	60... 100	100... 200	200... 400	400... 700	700... 1000
Диаметр воздушной трубы, мм	15... 20	20... 25	25... 32	32... 38	38... 51	51... 63	63... 76

В эрлифте центральной системы при расчете учитывают стеснение живого сечения воздушной трубой. Если расчет покажет, что у форсунки диаметр трубы должен быть меньше, чем на уровне излива, то применяют телескопическую водоподъемную трубу.

Форсунка для выпуска воздуха — перфорированный участок трубы с отверстиями диаметром от 4 до 6 мм. Суммарную площадь отверстий форсунки принимают в два-три раза больше площади сечения воздушной трубы. При центральном расположении труб в качестве форсунки используется перфорированный отрезок воздушной трубы.

Достоинства эрлифта: простота конструкции; отсутствие в скважине движущихся деталей; возможность работы в искривленных скважинах, подъем воды со значительным содержанием взвеси, регулирование подачи и высоты подъема воды изменением подачи воздуха; аэрация (насы-

щение воздухом) воды при подъеме; возможность обслуживания одной компрессорной станцией нескольких скважин.

Недостатки эрлифтных установок: низкий общий КПД установки (эрлифта и компрессора), не более 0,25...0,35; необходимость значительного заглубления форсунки под динамический уровень воды, потребность в насосе второго подъема, повышенные эксплуатационные расходы на компрессорное хозяйство.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка (рис. 4.5) состоит из обсадной трубы, изготовленной из стекла и закрепленной на опорной раме сварной конструкции, воздушного водоподъемника, включающего водоподъемную трубу из стекла, форсунку, выполненную из латуни, воздушную трубу, приемный бак с отражателем.

В водоподъемной и обсадной трубах уровень воды по закону сообщающихся сосудов устанавливается на высоте $a-a$ (статический уровень).

Сжатый воздух от компрессора по воздушной трубе через форсунку подается в водоподъемную трубу. Образующаяся при этом смесь воздуха и воды (эмульсия) легче воды, будет подниматься по водоподъемной трубе и выливаться в приемный бак.

После включения эрлифта статический уровень $a-a$ начнет понижаться и установится так называемый динамический уровень $b-b$, который будет тем ниже, чем интенсивнее откачка.

Эмульсия, выходя из водоподъемной трубы, ударяется об отрагатель, при этом воздух отделяется от воды. Отработанный воздух удаляется через отверстия в крышке бака, а вода через отверстие в дне бака самотеком при открытом вентиле возвращается в обсадную трубу.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1. Открыть вентиль 4, наполнить водой обсадную трубу.
2. Определить уровень воды в обсадной трубе — статический уровень $a-a$ (h_a).
3. Включить компрессор.
4. Открыть вентиль 8 подачи воздуха и отрегулировать необходимую подачу воздуха для непрерывного подъема воды.

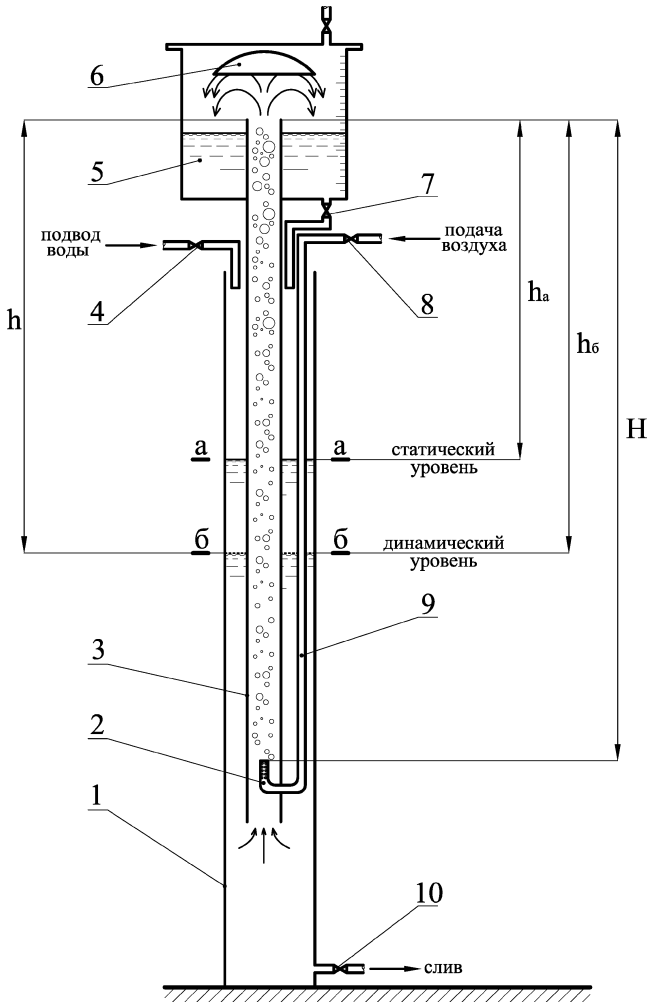


Рис. 4.5

Схема экспериментальной установки:

- 1 — обсадная труба; 2 — форсунка; 3 — водоподъемная труба;
 4 — вентиль подачи воды в обсадную трубу; 5 — приемный бак; 6 — отражатель;
 7 — вентиль слива воды из приемного бака; 8 — вентиль подачи воздуха;
 9 — труба подачи воздуха; 10 — вентиль слива воды из обсадной трубы.

5. Определить динамический уровень $\delta-\delta$ (h_6) воды в обсадной трубе.

6. Определить заглубление форсунки под динамический уровень (h_ϕ) и высоту подъема воды (h).

7. Определить расход воды, поступающей в приемный бак, для чего выполнить следующее:

7.1. Закрыть вентиль 7 слива воды из приемного бака.

7.2. Определить время, за которое в приемный бак поступит определенный объем воды. Объем контролировать по шкале приемного бака, протарированной в кубических сантиметрах.

7.3. Открыть вентиль 7.

8. Результаты наблюдений поместить в таблицу опытных данных.

9. Произвести обработку опытных данных.

ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

1. Рассчитать заглубление форсунки под динамический уровень:

$$h_\phi = H - h_6.$$

2. Вычислить расход воды при непрерывной подаче эрлифта:

$$Q = \frac{W}{t}.$$

3. Рассчитать коэффициент погружения форсунки:

$$k = \frac{H}{h}.$$

4. Определить пусковое давление компрессора:

$$p_{\text{п}} = 0,01(H - h_{\text{а}} + 2), \text{ МПа},$$

где $h_{\text{а}}$ — глубина статического горизонта воды в скважине, м.

5. Вычислить гидравлический КПД эрлифта:

$$\eta_{\text{г}} = \frac{(k-1)^{0,85}}{1,05k}.$$

6. Сделать выводы по работе.

Таблица опытных данных

Наименование показателя	Обозначение	Единица измерения	Опыт	
			1	2
1. Статический уровень в обсадной трубе	h_a	см		
2. Динамический уровень в обсадной трубе	h_b	см		
3. Заглубление форсунки	H	см		
4. Заглубление форсунки под динамический уровень	$h_{\phi} = H - h_b$	см		
5. Давление нагнетания воздуха	p	кгс/см ²		
6. Высота подъема воды	h	см		
7. Объем воды в мерном баке	W	см ³		
		л		
8. Время замера	t	с		
9. Расход воды при непрерывной подаче эрлифта	$Q = \frac{W}{t}$	л/с		
10. Коэффициент погружения	$k = \frac{H}{h}$	—		
11. Пусковое давление компрессора	$p_n = 0,01(H - h_a + 2)$	МПа		
12. Гидравлический КПД эрлифта	$\eta_o = \frac{(k-1)^{0,85}}{1,05k}$	—		

Контрольные вопросы

1. Расскажите о назначении, конструкции и принципе действия воздушных водоподъемных установок (эрлифтов).
2. В чем заключается гидравлический расчет эрлифта?
3. Чему равен КПД воздушного водоподъемника?
4. С какой глубины можно поднимать воду с помощью эрлифта?
5. Что такое статический уровень воды?
6. Что такое динамический уровень воды?
7. Какой гидравлический закон лежит в основе работы эрлифта?
8. Что является источником сжатого воздуха в эрлифте?
9. Достоинства и недостатки воздушных водоподъемных установок.
10. Как определить пусковое и рабочее давление компрессора эрлифта?

Лабораторная работа № 4.3

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ВОДОПОДЪЕМНОЙ УСТАНОВКИ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучить теоретические сведения по теме лабораторной работы.
2. Определить рабочие параметры установки, сделать выводы по работе.

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

Гидропневматические напорно-регулирующие установки (рис. 4.6), применяемые вместо водонапорных башен, предназначены для механизации и автоматизации водоснабжения жилых, коммунальных и общественных зданий, животноводческих ферм, небольших предприятий сельскохозяйственного производства и других объектов с суточным расходом воды до 150 м^3 . Их используют также в тех случаях, когда строительство высоких водонапорных башен нецелесообразно ввиду слабых грунтов, в сейсмических районах, вблизи аэродромов и в других особых условиях.

Установка представляет собой гидропневматический (воздушно-водяной) бак, в нижней части которого находится регулирующий объем воды, а в верхней — сжатый воздух, который оказывая давление на воду, создает требуемый напор. Давление воздуха при нижнем положении уровня воды в баке должно быть эквивалентным высоте положения водонапорной башни. При этом гидропневматическая установка будет создавать тот же напор в сети, что и водонапорная башня (рис. 4.6).

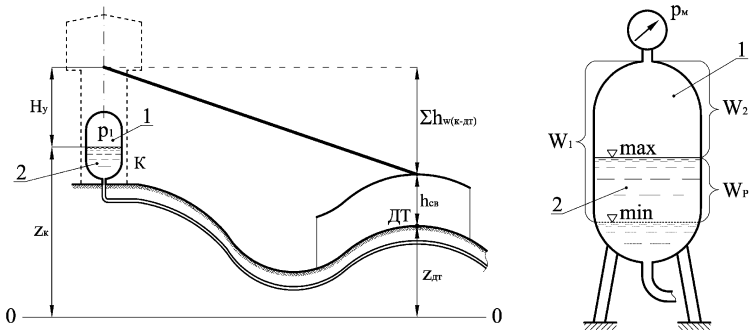


Рис. 4.6

Схема гидропневматической установки:

1 — сжатый воздух; 2 — регулирующий объем воды.

Если подача воды насосами равна расходу водопотребления, то вся вода поступает в сеть.

Если подача воды превосходит ее потребление, то избыточное количество воды заполняет бак и давление в нем повышается, достигнув определенного заданного значения, реле, установленное в верхней части бака, отключает насосный агрегат с помощью магнитного пускателя. В тех случаях, когда насос не работает, вода подается потребителю из бака под напором сжатого воздуха и давление в баке уменьшается. Обратное поступление воды в напорный трубопровод предотвращается за счет установки обратного клапана. При достижении минимальной величины давления внутри бака реле включает насосный агрегат. Минимальное давление в баке назначается исходя из условия обеспечения требуемого свободного напора в диктующей точке сети.

Гидропневматические напорно-регулирующие установки бывают переменного и постоянного давления.

В пневматических установках постоянного давления на трубе, соединяющей воздушный бак с водяным, ставят редукционный клапан. Этот клапан при понижении уровня воды в водяном баке пропускает в него воздух под постоянным давлением. При подъеме уровня воды в водяном баке воздух из него выпускается через специальный предохранительный клапан, также отрегулированный на заданное давление. Таким образом, в водяном баке может поддерживаться постоянное давление, что обеспечивает

возможность надлежащего подбора насосов и их работы при оптимальных значениях КПД.

Пневматические установки постоянного давления требуют непрерывной работы компрессора для восполнения сбросов воздуха при каждом наполнении водяного бака. Дополнительный расход энергии на работу компрессора в установках постоянного давления обычно превышает перерасход энергии, затрачиваемый на работу насосов под избыточными напорами в установках переменного давления. Установки постоянного давления менее экономичны и используются в тех редких случаях, когда колебание напора в сети не может быть допущено, например, в некоторых системах производственного водоснабжения, где изменение напора воды вызывает недопустимые колебания расходов.

Установки, в которых при накоплении и расходе регулирующего объема воды происходит изменение давления воздуха, называются *гидропневматическими установками переменного давления* (рис. 4.7).

Регулирование подачи гидропневматических установок достигается за счет изменения частоты периодических включений-отключений насосного агрегата. Частота циклов включений и отключений насоса в единицу времени зависит от регулируемого объема, производительности насоса и режима водопотребления.

Промышленность выпускает пневматические напорно-регулирующие установки в комплекте с насосом и станцией автоматического управления. Воздушно-водяной бак установки оснащают подающе-отводящей трубой, люком для осмотра и очистки бака, предохранительным клапаном и реле давления. В некоторых установках баки снабжены манометром, водомерным стеклом, а также аппаратом для автоматического пополнения воздуха. Для зарядки баков воздухом и пополнения его запасов применяют компрессоры или регуляторы объема воздуха, например, струйный регулятор (рис. 4.7), который работает следующим образом. Вода от насоса, проходя сопло струйного регулятора с большой скоростью, создает разрежение в полости вокруг конца сопла, воздух под атмосферным давлением открывает воздушный клапан и, смешиваясь с потоком воды, поступает в бак.

Подкачка воздуха происходит при условии, что жиклер трубки струйного регулятора будет перекрыт водой. Когда уровень воды в баке станет ниже жиклера, воздух под дав-

лением из бака будет поступать по трубке в камеру смешения струйного регулятора. Как только давление в камере смешения струйного регулятора превысит атмосферное, воздушный клапан закроется и подсос воздуха из атмосферы прекратится. При уменьшении объема воздушной подушки в баке жиклер вновь окажется ниже уровня воды, и подкачка воздуха через воздушный клапан возобновится.

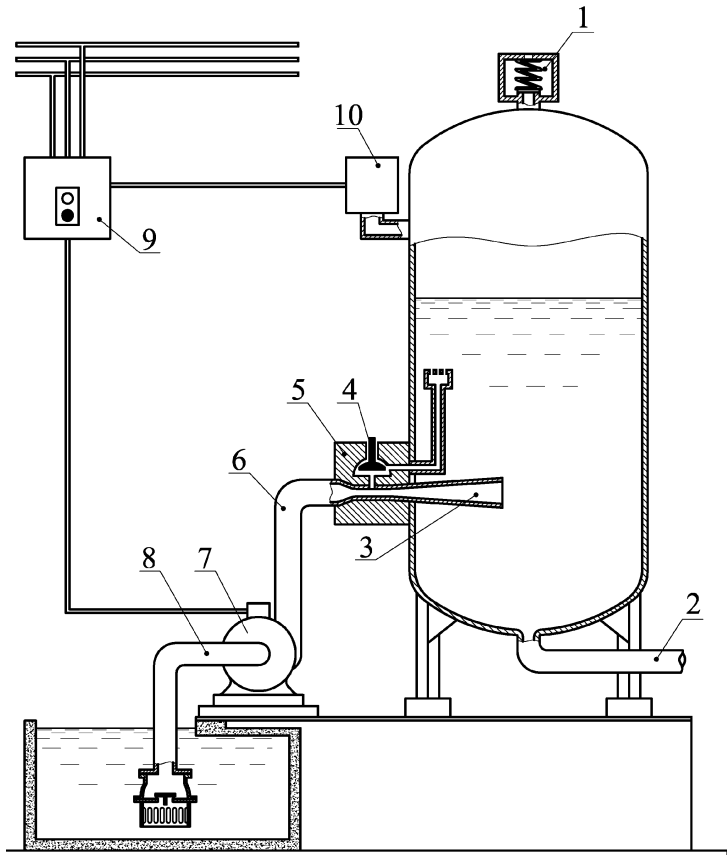


Рис. 4.7

Гидропневматическая установка переменного давления:

- 1 — предохранительный клапан; 2 — напорная труба; 3 — струйный аппарат;
4 — поплавковый клапан; 5 — струйный регулятор; 6 — нагнетательная труба;
7 — насос; 8 — всасывающая труба; 9 — электрическая станция управления;
10 — реле давления.

Техническое состояние воздушно-водяных баков должно систематически контролироваться.

Расчет пневматической напорно-регулирующей установки переменного давления заключается в определении вместимости бака, а также минимального и максимального давления воздуха. Так как напорные воздушно-водяные баки имеют высокую стоимость, то регулирующий объем можно сократить за счет укомплектования установки группой насосов, управляемых отдельными реле давления. Схема управления должна обеспечивать поочередное включение насосов в зависимости от давления воды в баке. Помимо регулирующего объема, в баке создают мертвый запас воды (30% от объема расчетной регулирующей емкости на случай запаздывания в срабатывании автоматической аппаратуры).

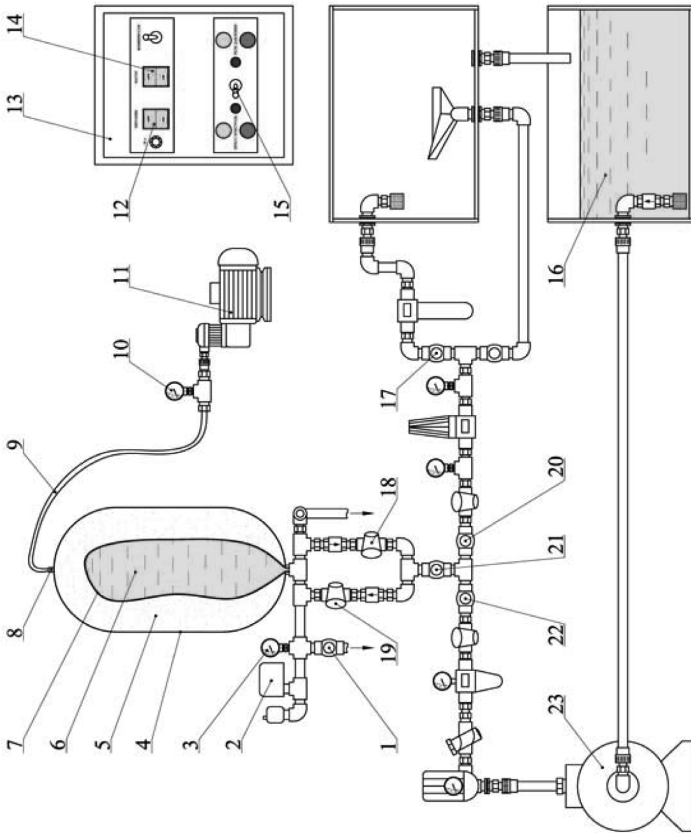
Установку рассчитывают для работы в наиболее напряженном режиме с максимально возможным суточным числом включений $n = 150...300$. Часовая подача насоса должна в 1,1...1,3 раза превышать максимальный часовой расход. При определении максимального расчетного числа включений учитывают, что возрастание их числа уменьшает емкость бака, увеличивает износ насосного оборудования, скважины и потребление электроэнергии на 1 м³ поданной воды.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Автоматическая водоподъемная установка (рис. 4.8) включает мембранный напорный бак, реле давления, центробежный самовсасывающий насос, станцию управления и питающий резервуар, смонтированные на общей раме.

Мембранный бак состоит из корпуса, изготовленного из листовой стали, покрытой эмалью, который разделен сменной мембраной на две камеры: водяную и воздушную. В воздушной камере находится предварительно закачанный на заводе воздух. Контакт воды с металлическими поверхностями корпуса мембранного бака невозможен, так как вся вода поступает в водяную камеру — мембрану, материалом которой является бутил (износостойкий резиновый материал, не восприимчивый к воздействию бактерий и удовлетворяющий всем гигиеническим и санитарным нормам для питьевой воды). Со стороны воздушной камеры в корпусе мембранного бака располагается пневмоклапан, предназначенный для регулирования давления воздуха.

Рис. 4.8
Схема
лабораторной пневматической
водоподъемной установки.



- 1 — кран слива воды; 2 — реле давления;
3 — манометр контроля давления
срабатывания реле; 4 — мембранный бак;
5 — воздушная камера мембранного бака;
6 — водяная камера мембранного бака;
7 — мембрана; 8 — пневмоклапан;
9 — воздушный шланг; 10 — манометр
контроля давления воздуха;
11 — компрессор;
12 — выключатель питания установки;
13 — станция управления;
14 — выключатель управления насосом;
15 — тумблер выбора режима
работы установки;
16 — питающий резервуар;
17, 20 — краны обросной линии;
18, 19 — тахометрические счетчики
количества жидкости на обросной
и подводящей линиях соответственно;
21, 22 — кран подводящей линии;
23 — насос.

К нижней части бака присоединяется предохранительный клапан, манометр, реле давления, напорный трубопровод и трубопровод разводящей сети, по которому вода поступает к потребителю.

Станция управления совместно с реле давления составляет систему автоматического управления водоподъемной установкой.

Автоматическое управление электродвигателем насоса водоподъемной установки происходит в зависимости от давления в воздушно-водяном баке.

При заданном давлении включения p_1 электродвигатель насоса автоматически включается в сеть, а при заданном давлении выключения p_2 автоматически выключается.

Станция управления обеспечивает:

1. Автоматический пуск и остановку насоса.
2. Защиту от токов короткого замыкания и технологических перегрузок.
3. Ручной пуск и при необходимости ручную остановку насоса.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1. Открыть кран 1 слива воды из мембранного бака 4, когда бак опорожнится, кран закрыть.

2. Присоединить штуцер воздушного шланга 9 компрессора 11 к пневмоклапану мембранного бака 8 и по манометру 10 проконтролировать и записать давление воздуха в воздушной камере 5 мембранного бака. Отсоединить штуцер.

3. Открыть кран 21 на подводящей линии и закрыть краны 20 и 17 на сбросной линии.

4. На станции управления 13 перевести выключатель управления насосом 14 в положение «Выкл» («0») и только тогда включить питание установки выключателем 12, затем переключить тумблер выбора режима работы установки 15 в положение «РЕЛЕ ДАВЛЕНИЯ».

5. Записать показания тахометрического счетчика количества жидкости 18 W_{1H} на подводящей линии и включить насос выключателем 14, одновременно включить секундомер для замера времени наполнения бака.

6. В момент остановки насоса зафиксировать и записать время наполнения мембранного бака t_1 , показания тахометрического счетчика 18 W_{1K} и давление автоматического выключения насоса $p_{\text{выкл}}$ по манометру 3.

7. Записать показания тахометрического счетчика количества жидкости $19 W_{2Н}$ на сбросной линии, открыть краны 17 и 20 и одновременно включить секундомер.

8. В момент включения насоса зафиксировать и записать давление автоматического включения насоса $p_{вкл}$, время опорожнения регулирующего объема бака t_2 и показания тахометрического счетчика ($19 W_{2К}$).

9. Произвести обработку опытных данных.

ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

1. Вычислить напор при включении насоса:

$$H_{вкл} = \frac{p_{вкл}}{\gamma}.$$

2. Рассчитать напор в момент выключения насоса:

$$H_{выкл} = \frac{p_{выкл}}{\gamma}.$$

3. Определить среднюю подачу насоса:

$$Q_n = \frac{W_{1К} - W_{1Н}}{t_1}.$$

4. Рассчитать средний расход потребления:

$$Q_{п} = \frac{W_{2К} - W_{2Н}}{t_2}.$$

5. Сделать выводы по работе.

Т а б л и ц а 4.5

Таблица опытных данных

Наименование показателя	Обозначение	Единица измерения	Опыт	
			1	2
1. Давление воздуха в воздушной камере бака	$p_{возд}$	бар		
2. Давление включения насоса	$p_{вкл}$	бар		
		Па		
3. Давление выключения насоса	$p_{выкл}$	бар		
		Па		
4. Напор при включении насоса	$H_{вкл} = \frac{p_{вкл}}{\gamma}$	м		

Продолжение табл. 4.5

Наименование показателя	Обозначение	Единица измерения	Опыт	
			1	2
5. Напор в момент выключения насоса	$H_{\text{выкл}} = \frac{P_{\text{выкл}}}{\gamma}$	м		
6. Показания тахометрического счетчика на подводящей линии:				
до замера	$W_{1Н}$	м ³		
		л		
после замера	$W_{1К}$	м ³		
		л		
7. Показания механического счетчика на сбросной линии:				
до замера	$W_{2Н}$	м ³		
		л		
после замера	$W_{2К}$	м ³		
		л		
8. Время наполнения бака	t_1	с		
9. Время опорожнения регулирующего объема бака	t_2	с		
10. Средняя подача насоса	$Q_H = \frac{W_{1К} - W_{1Н}}{t_1}$	л/с		
11. Средний расход потребления	$Q_{\Pi} = \frac{W_{2К} - W_{2Н}}{t_2}$	л/с		

Контрольные вопросы

1. Назначение гидропневматических водоподъемных установок.
2. Классификация гидропневматических водоподъемных установок.
3. Конструкция и принцип действия гидропневматической водоподъемной установки постоянного давления.

4. Конструкция и принцип действия гидропневматической водоподъемной установки переменного давления.
5. Назначение и устройство струйного регулятора воздуха.
6. Для каких целей необходимо реле давления в конструкции гидропневматической водоподъемной установки?
7. В чем заключается назначение редукционного клапана в пневматических водоподъемных установках постоянного давления?
8. Назначение мембраны в конструкции мембранного бака автоматической водоподъемной установки.
9. Какой тип насосов используют в конструкции гидропневматической водоподъемной установки?
10. Расскажите об условиях запуска гидропневматической водоподъемной установки.

Лабораторная работа № 4.4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ТАРАНА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучить теоретические сведения по теме лабораторной работы.
2. Определить рабочие параметры гидравлического тарана, сделать выводы по работе.

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

Гидравлический таран — это автоматически действующий водоподъемник, не требующий для своего действия какого-либо дополнительного двигателя. Водоподъемную установку с использованием тарана называют «водокачкой без мотора».

Для подъема воды гидравлический таран использует энергию гидравлического удара, который периодически возникает в трубе подводящей воду к тарану от источника, расположенного выше тарана, но ниже резервуара в который подается вода (рис. 4.9). Тараны применяются в том случае, если имеется запас воды значительно больший того, который требуется поднять.

Основными конструктивными элементами тарана являются ударный клапан, напорный клапан и напорный воздушный колпак, который служит буфером, не допускающим распространения гидроудара в нагнетательную трубу, и выравнивающим подачу воды (рис. 4.10).

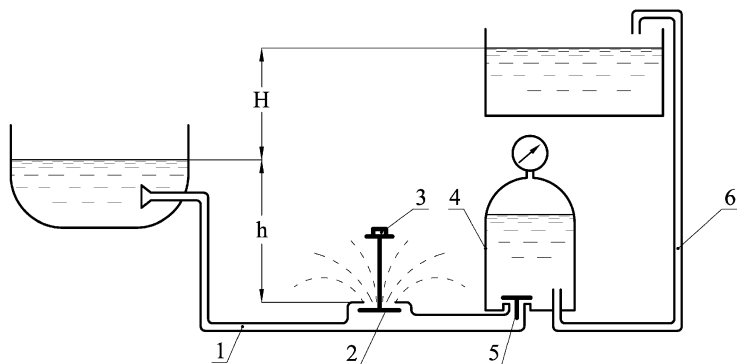


Рис. 4.9

Схема гидротаранной установки:

1 — подводящая труба; 2 — ударный клапан; 3 — груз;
4 — напорный воздушный колпак; 5 — напорный клапан;
6 — водоподъемная труба (нагнетательный трубопровод).

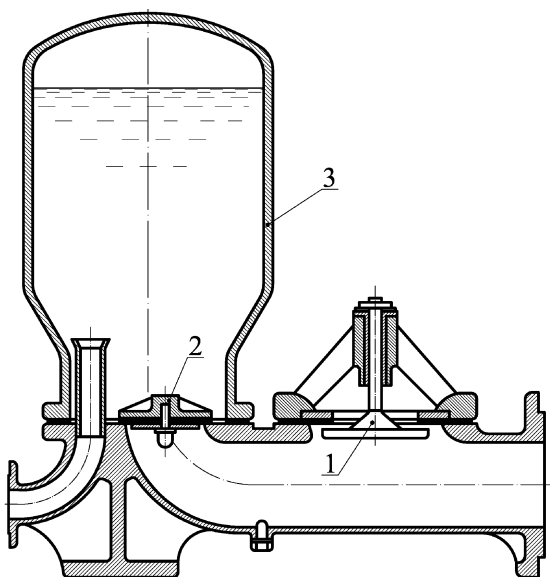


Рис. 4.10

Гидравлический таран типа ТГ-1:

1 — ударный клапан; 2 — напорный клапан;
3 — напорный воздушный колпак.

Рабочий процесс в гидравлическом таране начинается после принудительного открытия ударного клапана при пуске (клапан открывают рукой). Вода в подводящей трубе движется с возрастающим ускорением, вытекая через отверстие клапана, и в некоторый момент времени закрывает ударный клапан, преодолевая его вес. Возникает гидравлический удар, кратковременно повышающий давление в трубе сверх давления в присоединенном к ней воздушном колпаке. Открывается нагнетательный клапан, вода поступает в напорный воздушный колпак, сжимая в нем воздух, при этом кинетическая энергия водяного столба преобразуется в потенциальную энергию сжатого воздуха. Давление в подводящей трубе понижается, закрывается нагнетательный клапан, автоматически открывается ударный клапан, и вода, приходя в движение, вытекает через него. С этого момента процесс повторяется вновь.

По мере заполнения водой напорного воздушного колпака давление в нем увеличивается ввиду того, что уменьшается объем, занимаемый воздухом, и вода из тарана по напорной трубе подается потребителю. Непременным условием исправного действия гидравлического тарана является наличие воздуха в напорном воздушном колпаке. Остановить таран можно закрытием ударного клапана.

В процессе работы гидравлический таран подает меньшее количество воды, чем то, которое подводится к нему. На производительность тарана, кроме его размеров, существенное влияние оказывает число ударов ударного клапана. Чем тяжелее ударный клапан, тем больше воды сбрасывается наружу и тем меньше КПД тарана. Число ударов клапана регулируют грузами и устанавливают в зависимости от длины и диаметра питающей трубы, высоты падения жидкости и высоты подъема.

Коэффициент полезного действия тарана определяется по формуле

$$\eta = \frac{q \cdot H}{Q \cdot h},$$

где q — производительность тарана; Q — расход воды, поступающей к тарану по подводящей трубе; H — высота подъема воды; h — высота падения воды (питательный напор).

Таран может работать, начиная с $h = 0,2$ м, соотношение напора $\frac{H}{h}$ может достигать значения, равного 15...20.

При больших значениях этого соотношения работа таранной установки малоэффективна.

Крупным недостатком таранов является их небольшая производительность, для увеличения которой в таранной установке используют параллельную работу двух или более таранов.

Параллельная работа таранов осуществляется следующими способами (рис. 4.11):

- с установкой отдельной питательной трубы для каждого тарана;
- с присоединением всех таранов к одной питательной трубе.

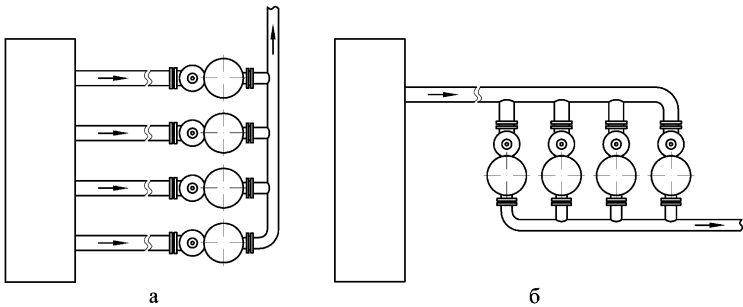


Рис. 4.11

Схема установки с параллельно работающими таранами:

а — с отдельными питающими трубами; б — с общей питательной трубой.

В обоих случаях тараны присоединяются к общему нагнетательному трубопроводу.

При установке с отдельными питательными трубами, тараны работают независимо друг от друга с индивидуальными тактами; если же питательная труба общая, то все тараны работают синхронно.

При очень больших соотношениях $\frac{H}{h}$, когда КПД установки становится очень маленьким и работа тарана неэффективной, применяют ступенчатое нагнетание (рис. 4.12).

Первый таран, используя весь питательный напор, поднимает воду не на всю высоту, а лишь на некоторую ее часть. Второй таран устанавливают на уровне первого, питательным расходом для него является нагнетательный

расход первого тарана. Нагнетание происходит на всю высоту. Работа обоих таранов происходит при сравнительно небольшом соотношении напоров.

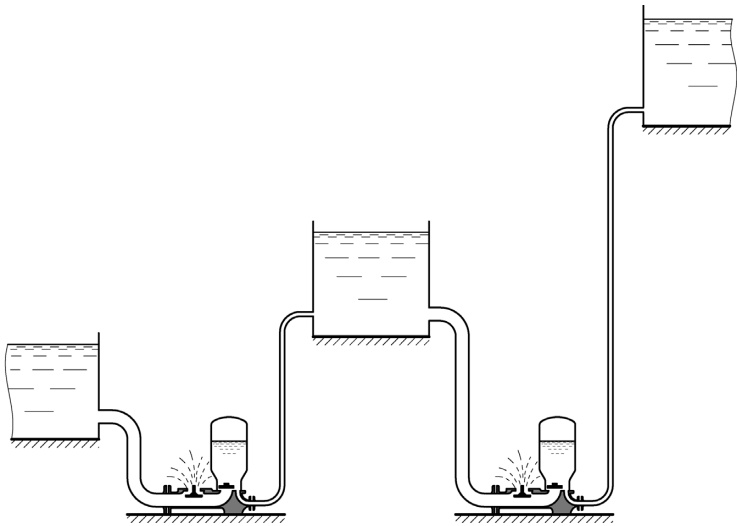


Рис. 4.12

Схема гидротаранной установки двухступенчатого нагнетания

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка (рис. 4.13) состоит из питающего бака 2, подводящего 1 и сливного 24 трубопроводов, пульта управления 3 насосом 23, обеспечивающим заполнение и поддержание постоянного уровня жидкости в напорном баке 13, за счет перелива излишков жидкость по трубопроводу 21 обратно в питающий бак 2. Гидравлический удар в установке возникает в результате перекрытия ударного клапана 18, в момент, когда сила гидродинамического давления жидкости поступающей по трубопроводу 15 из напорного бака 13 превысит вес грузов 17, закрепленных на штоке ударного клапана 18. В момент возникновения гидравлического удара часть жидкости, находящейся под давлением, проходит через напорный клапан 19 в пневматический бак 7 и далее по напорному трубопроводу 10 в приемный бак 12. Количество жидкости, поступающее в приемный бак 12, фиксируется расходомером 6,

давление в напорном трубопроводе 10 манометром 5. Пневматический бак 7 разделен пластичной мембраной на две части, в одной части бака находится сжатый воздух, давление которого измеряет манометр 9, в другую поступает под давлением жидкость. Жидкость, выливающаяся через ударный клапан 18, поступает в мерный бак 4, снабженный шкалой 20 и запорным краном 22. Остановка гидравлического тарана осуществляется перекрытием крана 16, установленного на питающем трубопроводе 15. Кран 8 позволяет осуществить настройку гидротарана в начале его работы.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1. Перекрыть кран на сливном трубопроводе 24.
2. Наполнить питающий бак 2 водой.
3. Перекрыть кран 16.
4. Включить подачу насоса 23 и заполнить водой напорный бак 13.
5. Проконтролировать, чтобы баки 4 и 12 были опорожнены и кран 8 напорного трубопровода 10 открыт.
6. Ударный клапан 18 поднять в верхнее положение и, придерживая его в закрытом состоянии, открыть кран 16 на нагнетательной трубе 15.
7. Резким толчком открыть ударный клапан. Под давлением потока воды он должен закрыться сам. Если этого не произойдет, то вес грузов 17 на штоке ударного клапана 18 необходимо снизить.
8. При закрытии ударного клапана возникнет гидравлический удар, вызывающий резкое повышение давления воды с последующим снижением, в момент которого ударный клапан должен открыться сам. Если этого не произойдет, значит, необходимо увеличить вес грузов 17 на штоке ударного клапана 18.
9. Убедиться в стабильной работе гидравлического тарана — ударный клапан должен самостоятельно периодически закрываться и открываться и дожидаться момента, когда из напорного трубопровода 10 в приемный бак 12 начнет выливаться вода.
10. Зафиксировать отметку уровня свободной поверхности жидкости в напорном баке 13 по шкале 11.
11. Манометром 9 замерить рабочее давление в пневматическом баке.
12. Открыть кран 8.

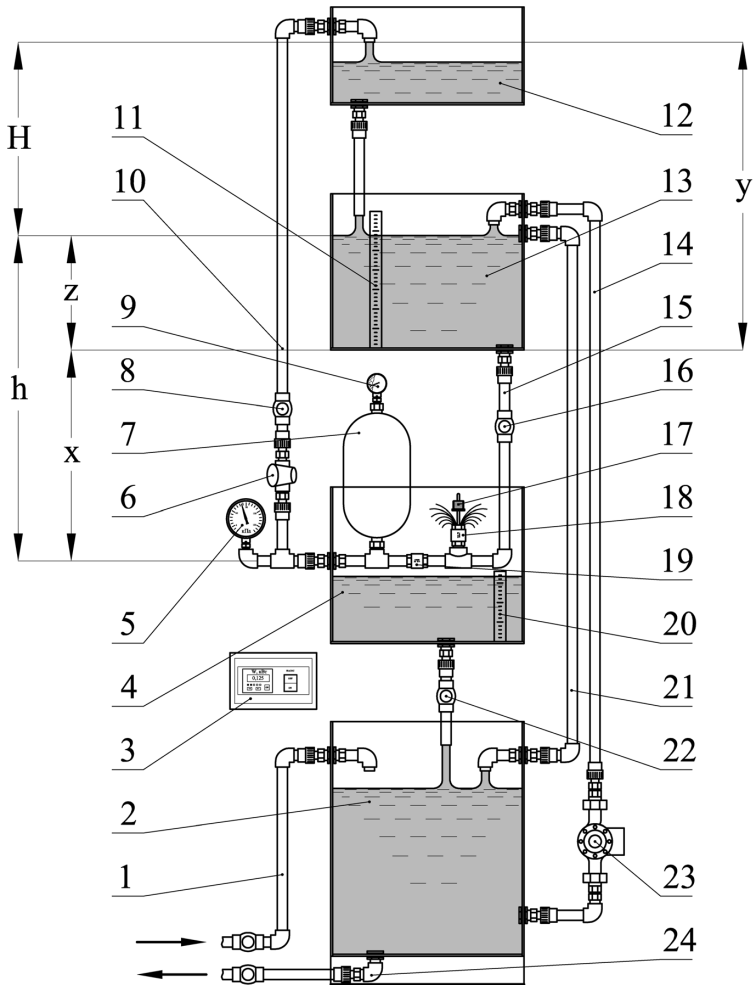


Рис. 4.13

Схема лабораторной установки:

- 1 — подводящий трубопровод; 2 — питающий бак; 3 — пульт управления насосом;
 4 — мерный бак; 5, 9 — манометры; 6 — расходомер; 7 — пневматический бак;
 8, 16, 22 — краны; 10 — напорный трубопровод; 11, 20 — шкала;
 12 — приемный бак; 13 — напорный бак; 15, 21 — трубопроводы; 17 — груз;
 18 — ударный клапан; 19 — напорный клапан; 23 — насос;
 24 — сливной трубопровод.

13. По манометру 5 измерить давление нагнетания.

14. По расходомеру 6 определить расход воды, нагнетаемой гидротараном в напорный трубопровод.

15. Объемным способом определить расход воды, вытекающей через ударный клапан, для этого перекрыть кран 22 и засечь время, за которое в мерном баке 4 заполнится определенный объем. Объем воды в баке контролируется с помощью шкалы 20.

16. Остановить работу гидротарана, перекрыв кран 16.

17. Выключить насос и слить воду из лабораторной установки, открыв кран на сливном трубопроводе 24.

18. Произвести обработку опытных данных.

ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

1. Определить высоту открытия ударного клапана:

$$h_{\text{кл}} = \frac{d^2}{4d_{\text{к}}}.$$

2. Определить скорость распространения ударной волны:

$$C = \frac{\sqrt{\frac{E_0}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{E_0}{E} \cdot \frac{d}{\delta}}}.$$

3. Определить скорость движения воды до удара

$$v_0 = \varphi \cdot \sqrt{2gh}.$$

4. Максимальное повышение давления при гидроударе

$$\Delta p = \rho \cdot C \cdot v_0.$$

5. Определить теоретическую производительность таранной установки

$$Q_{\text{т}} = \frac{Q_1 \cdot h \cdot K}{H + h}.$$

6. Количество воды, поступающей в таран

$$Q_1 = \frac{\pi d^2}{4} v_0.$$

7. КПД установки

$$\eta = \frac{(H + h) \cdot Q_2}{h \cdot Q_1}.$$

8. Сделать выводы по работе.

Т а б л и ц а 4.6

Таблица опытных данных

Наименование показателя	Обозначение	Единица измерения	Опыт	
			1	2
1. Вертикальные расстояния	y	м		
	x	м		
2. Диаметр трубопровода, питающего таран	d	м		
3. Толщина стенок питающего трубопровода	δ	м		
4. Диаметр ударного клапана	d_{κ}	м		
5. Модуль объемной упругости воды	E_0	Па		
6. Модуль упругости материала трубопровода	E	Па		
7. Уровень свободной поверхности жидкости в напорном баке	z	м		
8. Рабочее давление в колпаке	$\rho_{\text{в}}$	Па		
9. Давление нагнетания	$\rho_{\text{н}}$	Па		
10. Объем воды в мерном баке	W_y	м ³		
11. Время замера	t_y	с		
12. Расход воды, вытекающей через ударный клапан	$Q_y = W_y/t_y$	м ³ /с		
13. Расстояние от оси тарана до уровня воды в питательном баке	$h = x + z$	м		
14. Высота нагнетания	$H = y - z$	м		
15. Высота открытия ударного клапана	$h_{\kappa\text{л}} = \frac{d^2}{4d_{\kappa}}$	м		

Продолжение табл. 4.6

Наименование показателя	Обозначение	Единица измерения	Опыт	
			1	2
16. Скорость распространения ударной волны	$C = \frac{\sqrt{\frac{E_0}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{E_0}{E} \cdot \frac{d}{\delta}}}$	м/с		
17. Скорость движения воды до удара ($\varphi = 0,8...0,9$)	$v_0 = \varphi \cdot \sqrt{2gh}$	м/с		
18. Максимальное повышение давления при гидроударе	$\Delta p = \rho \cdot C \cdot v_0$	МПа		
19. Фактическая производительность тарана	Q_2	м ³ /с		
20. Количество воды, поступающей в таран	$Q_1 = Q_y + Q_2$	м ³ /с		
21. Теоретическая производительность таранной установки	$Q_\tau = \frac{Q_1 \cdot h \cdot K}{H + h}$	м ³ /с		
22. Коэффициент гидравлических потерь, зависящий от соотношения $\frac{H+h}{h} = (4...8)$	$K = 0,72...0,56$	—		
23. КПД установки	$\eta = \frac{(H+h) \cdot Q_2}{h \cdot Q_1}$	—		

Контрольные вопросы и задания

1. Расскажите о назначении, конструкции и принципе действия гидравлического тарана.
2. Какое физическое явление лежит в основе работы гидравлического тарана?
3. Какое условие необходимо соблюсти, чтобы гидравлический таран работал?

4. Достоинства и недостатки гидравлических таранов.
5. Для чего используется параллельная работа двух и более таранов?
6. Для чего используется последовательная работа двух и более таранов?
7. Почему в процессе работы гидравлический таран подает меньшее количество воды, чем то, которое подводится к нему?
8. Как определить высоту открытия ударного клапана?
9. Как определить максимальное повышение давление при гидроударе в гидротаране?
10. Как определить теоретическую производительность таранной установки?

Лабораторная работа № 4.5

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ДОЖДЕВАЛЬНОГО АППАРАТА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучить теоретические сведения по теме лабораторной работы.
2. Исследовать работу дождевального аппарата, снять его расходно-напорную характеристику.
3. Установить зависимость угловой скорости дождевального аппарата от напора воды, сделать выводы по работе.

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

Для достижения высоких и устойчивых урожаев сельскохозяйственных культур применяют искусственное увлажнение почвы — орошение (ирригацию). Оросительной системой называется комплекс сооружений и механизмов служащих для забора воды из источника, транспортировки и распределения ее по орошаемой площади. Оросительная сеть может состоять из закрытых трубопроводов или передвижных дождевальных агрегатов. Непременной составной частью любых дождевальных машин и устройств являются дождевальные аппараты.

Дождевальные аппараты классифицируются по рабочим параметрам на дальнеструйные и среднеструйные.

К среднеструйным аппаратам относятся аппараты с радиусом захвата $R = 15...45$ м, работающих при давлении от 0,15 до 0,4 МПа.

К дальнеструйным аппаратам относятся аппараты с радиусом захвата $R = 45$ м и более, работающие при давлении свыше 0,4 МПа.

Среднеструйные аппараты применяются как на дождевальных системах, так и на широкозахватных многоопорных дождевальных машинах.

Дождевальные аппараты подразделяются по конструкции механизма поворота ствола и принципу его действия на следующие группы:

а) дождевальные аппараты с приводом от качающегося коромысла, качающегося в горизонтальной или вертикальной плоскости (рис. 4.14);

б) дождевальные аппараты с приводом от турбинки (рис. 4.15);

в) дождевальные аппараты, приводящиеся во вращение благодаря вакууму, создаваемому потоком жидкости;

г) дождевальные аппараты, вращающиеся за счет реактивного действия струи.

Среднеструйный дождевальный аппарат (рис. 4.16) состоит из стакана 2, который переходит в ствол 10, оканчивающийся большим 8 и малым 3 соплами. В стволе расположен успокоитель (выпрямитель) потока 9. На стволе 10 шарнирно закреплено коромысло 6, подпружиненное относительно ствола пружиной 4. Коромысло 6 снабжено на своем конце двумя лопатками 5 и 7. Стакан 2 через втулку 1 соединен со штуцером 11, посредством которого аппарат устанавливается на трубопроводе машины.

Аппарат работает следующим образом (рис. 4.17). Струя воды, вытекающая из большого сопла 8, выталкивает лопатку 5 по направлению стрелки, при этом коромысло 6 отбрасывается в сторону на определенный угол и закручивает пружину 4. Обратный ход коромысло совершает под действием пружины. В конце этого хода лопатка 9 втягивается струей, действие которой дополнительно толкает коромысло в направлении его движения. В конце обратного хода коромысло ударяет о прилив ствола, поворачивая последний на некоторый угол. Далее цикл повторяется, и ствол при этом вращается вокруг вертикальной оси. Малое сопло служит для орошения близлежащей около аппарата площади, а большое для орошения периферийной части площади. Успокоитель или выпрямитель потока 9, расположенный в проточной полости ствола аппарата, предназначен для выравнивания потока и снижения турбулентных пульсаций, что способствует увеличению дальности полета струи.

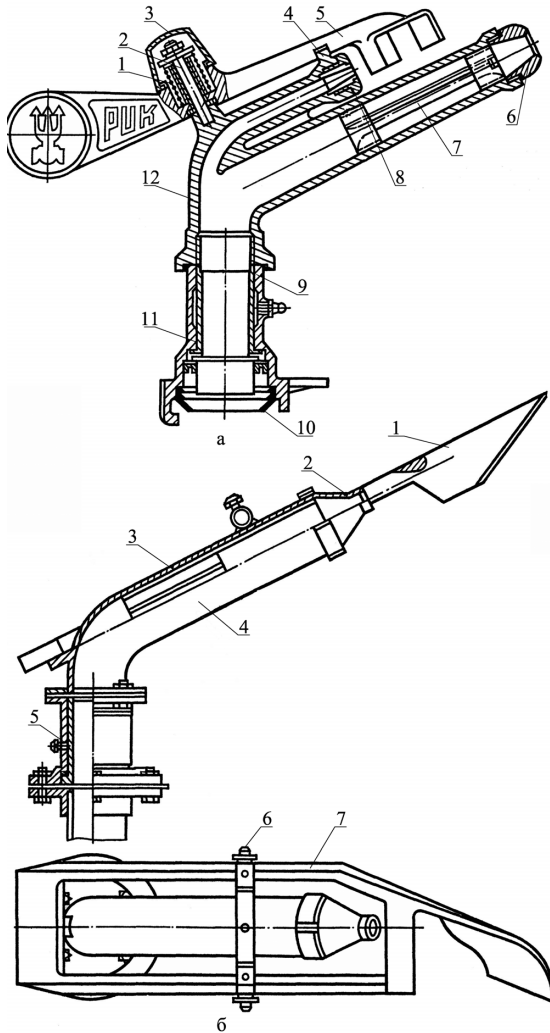


Рис. 4.14

Среднеструйные дождевалыные аппараты коромыслового типа:

- a* — с коромыслом, качающимся в горизонтальной плоскости: 1 — пружина;
 2 — ось; 3 — крышка; 4 — ударный прилив; 5 — коромысло; 6 — большое сопло;
 7 — успокоитель; 8 — малое сопло; 9 — корпус; 10 — манжета; 11 — стакан;
 12 — ствол; *б* — с коромыслом, качающимся в вертикальной плоскости:
 1 — лопатка; 2 — сопло; 3 — успокоитель потока;
 4 — ствол; 5 — корпус; 6 — ось; 7 — коромысло.

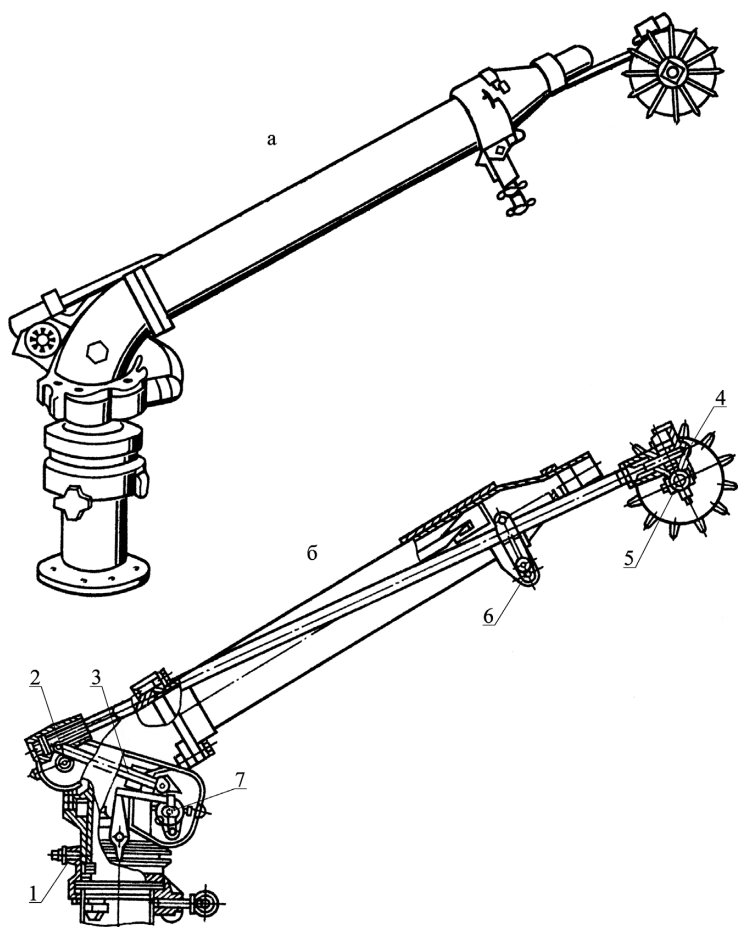


Рис. 4.15

Дальнеструйный дождевальный аппарат с приводом от турбины ДД-30:

- а* — общий вид; *б* — схема аппарата: 1 — упоры; 2, 5 — червячные передачи;
3 — реверсивное устройство; 4 — лопастная активная турбинка;
6 — регулировочный упор; 7 — ствол.

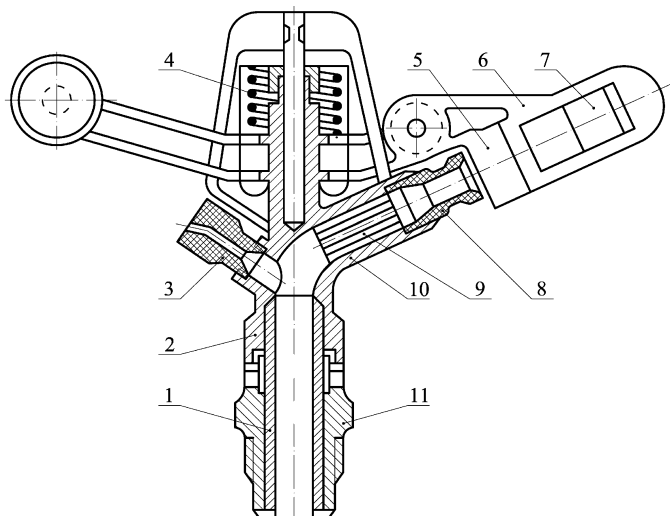


Рис. 4.16

Среднеструйный дождевальный аппарат:

1 — втулка; 2 — стакан; 3 — малое сопло; 4 — пружина; 5, 7 — лопатки;
6 — коромысло; 8 — большое сопло; 9 — успокоитель; 10 — ствол; 11 — штуцер.

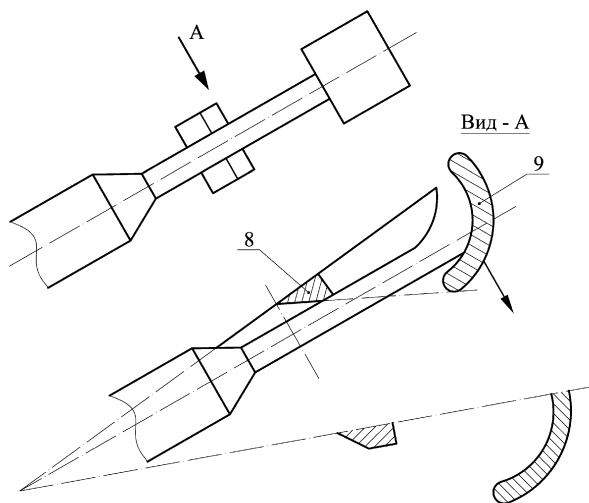


Рис. 4.17

Схема работы среднеструйного дождевального аппарата

Основной характеристикой дождевального аппарата является его расходно-напорная характеристика, по которой при известном конструктивном исполнении аппарата можно рассчитать основные характеристики создаваемого дождя, необходимые для его агротехнической оценки. Для учета динамического воздействия дождя на почву необходимо также знать скорость вращения аппарата.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка для испытаний дождевального аппарата (рис. 4.18) состоит из струеоградительного прозрачного колпака 8, стояка 6, на котором установлен дождевальный аппарат 7, сливного патрубка 9 и подводящего патрубка 5. На подводящем патрубке установлены манометр 3, водомерный счетчик 2 и регулировочный вентиль 4. На крышке прозрачного колпака 8 имеются градусные деления для определения угла поворота дождевального аппарата.

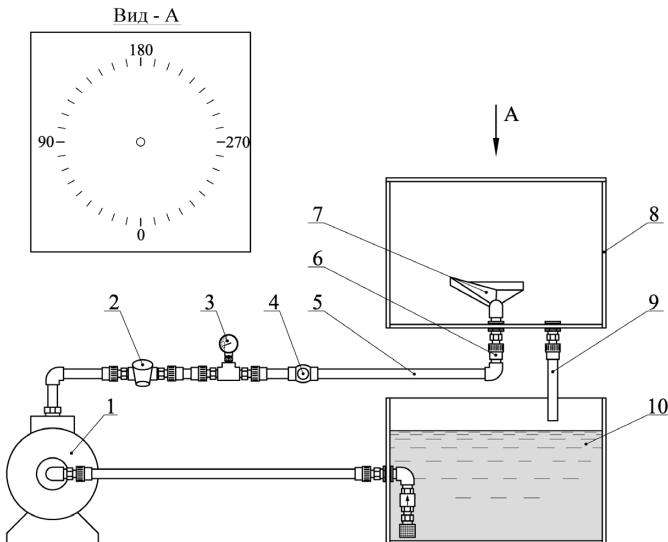


Рис. 4.18

Схема лабораторной установки:

- 1 — насос; 2 — водомерный счетчик; 3 — манометр; 4 — регулировочный вентиль;
 5 — подводящий патрубок; 6 — стояк; 7 — дождевальный аппарат;
 8 — струеоградительный прозрачный колпак; 9 — сливной патрубок;
 10 — питающий резервуар.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1. Произвести внешний осмотр установки и убедиться в отсутствии видимых повреждений.
2. Залить воду в бак и заполнить насос водой.
3. Включить насос 1.
4. Плавным поворотом регулировочного вентиля 4 установить давление $p_{\min}$, при котором дождевальнй аппарат начинает вращаться.
5. Определить по водосчетчику 2 объем воды W , поступающей в дождевальнй аппарат за время опыта t , измеряемое с помощью секундомера.
6. Определить по градуировке крышки струеоградительного колпака 8 угол поворота ствола дождевального аппарата за время опыта t .
7. Частично открыть вентиль 4, повысив давление на манометре на 0,5 бар и повторить пп. 5 и 6.
8. Повторять опыты (п. 7), увеличивая степень открытия вентиля 4 до максимума.
9. Закрыть регулировочный вентиль и выключить насос 1.
10. Произвести обработку опытных данных.

ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

1. Вычислить объем воды, поступившей в дождевальнй аппарат:

$$W = (n_2 - n_1)1000, \text{ дм}^3,$$

где n_1 — показание водомерного счетчика до опыта, м^3 ; n_2 — показание водомерного счетчика в конце опыта, м^3 .

2. Рассчитать расход дождевального аппарата по формуле

$$Q = \frac{W}{t}, \text{ л/с},$$

где t — время опыта, с.

3. Определить угловую скорость вращения аппарата:

$$\omega = \frac{2\pi}{t}, \text{ с}^{-1},$$

где t — время поворота аппарата.

4. Определить напор на дождевальном аппарате:

$$H = \frac{p_m}{\gamma}, \text{ м,}$$

где γ — удельный вес воды 9,81 кН/м³; p_m — показание манометра, кПа.

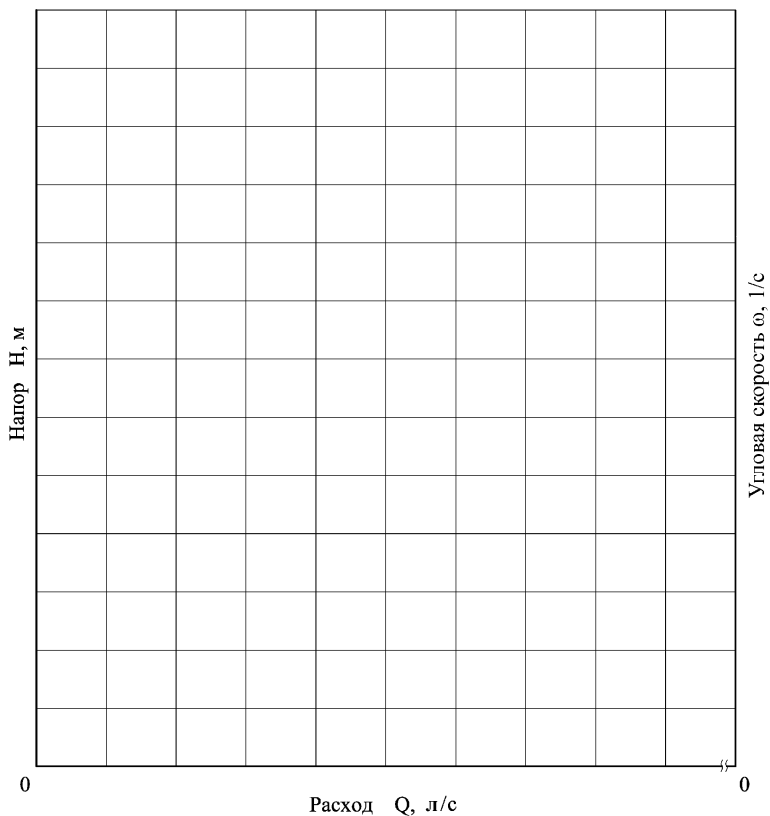
5. Построить расходно-напорную $Q-H$ и скоростную $\omega-H$ характеристики дождевального аппарата.

6. Сделать выводы по работе.

Т а б л и ц а 4.7

Таблица опытных данных

Наименование показателя	Обозначение	Единица измерения	Опыт				
			1	2	3	4	5
1. Давление по манометру	p_m	кПа					
2. Напор	$H = \frac{p_m}{\gamma}$	м					
3. Время опыта	t	с					
4. Показание водомерного счетчика:							
в начале опыта	n_1	м ³					
в конце опыта	n_2	м ³					
5. Количество воды, поступившей в аппарат за время опыта	$W = (n_1 - n_2)1000$	дм ³					
6. Расход аппарата	$Q = \frac{W}{t}$	л/с					
7. Угол поворота аппарата	φ	град					
8. Угловая скорость вращения аппарата	$\omega = \frac{2\pi}{t}$	с ⁻¹					

**Рис. 4.19**

*Расходно-напорная Q – H и скоростная ω – H характеристики
дождевального аппарата*

Контрольные вопросы

1. Для чего нужны дождевальные аппараты?
2. Как классифицируют дождевальные аппараты?
3. Какие рабочие параметры имеют дальнеструйные дождевальные аппараты?
4. Какие рабочие параметры имеют среднеструйные дождевальные аппараты?
5. На какие группы подразделяют дождевальные аппараты по конструкции механизма поворота ствола?

6. На какие группы подразделяют дождевальные аппараты по принципу действия механизма поворота ствола?
7. Из каких основных элементов состоит дождевальный аппарат?
8. В чем заключается принцип действия дождевального аппарата?
9. Зачем необходимы основные характеристики дождевального аппарата?
10. Из каких элементов состоит лабораторная установка?

**ПРИМЕРЫ
ТЕСТОВЫХ ЗАДАНИЙ
ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ
«ВОДОСНАБЖЕНИЕ»**

КАРТОЧКА РУБЕЖНОГО КОНТРОЛЯ

ВАРИАНТ № 1

№ п/п	Вопросы	Ответы
1	Водоснабжение — это	1. Обеспечение водой населенных пунктов, производственных и других объектов для удовлетворения хозяйственно-питьевых, производственных и противопожарных нужд. 2. Обеспечение водой населенных пунктов. 3. Обеспечение водой производственных объектов. 4. Запас воды для противопожарных нужд. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
2	Системы водоснабжения классифицируются (правильным считается полный ответ)	1. По назначению, характеру используемых природных источников и территориальному признаку. 2. По способам подачи воды и видам обслуживаемых объектов. 3. По способу доставки и распределения воды и степени обеспеченности подачи воды. 4. По характеру используемых природных источников и территориальному признаку и видам обслуживаемых объектов. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
3	Режим водопотребления — это	1. Распределение требуемого объема водопотребления во времени, который следует рассматривать как случайный процесс, формируемый под влиянием большого числа различных факторов. 2. Потребление воды в течение суток в зависимости от графика водопотребления.

Продолжение табл.

№ п/п	Вопросы	Ответы
3	Режим водопотребления — это	3. Случайный процесс подачи воды, формируемый под влиянием большого числа различных факторов. 4. Забор воды из источника водозаборными сооружениями в течение года. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
4	Максимальный коэффициент суточной неравномерности $k_{\text{max сут}}$ — это	1. Отклонение минимального суточного расхода от среднесуточного. 2. Отношение минимального суточного расхода к максимальному суточному расходу. 3. Отношение максимального суточного расхода к минимальному суточному расходу. 4. Отклонение максимального суточного расхода от среднесуточного. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
5	Диктующая точка — это	1. Точка сети, в которой свободный напор в час минимального водопотребления будет наименьшим. 2. Точка сети, в которой свободный напор в час максимального водопотребления будет наименьшим. 3. Точка сети, в которой свободный напор в час максимального водопотребления будет наибольшим. 4. Точка сети, в которой свободный напор в час минимального водопотребления будет наибольшим. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
6	Качество питьевой воды — это	1. Возможность использования воды для хозяйственно-питьевых нужд. 2. Безопасность воды по ее химическому составу. 3. Очистка ее от взвесей и бактерий, а также устранение цветности, привкусов, запахов. 4. Совокупность ее свойств, обусловленных характером и концентрацией содержащихся в воде примесей. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.

Продолжение табл.

№ п/п	Вопросы	Ответы
7	Согласно СанПиН 2.1.4.1074-01, питьевая вода должна быть	1. Безопасна в эпидемическом и радиационном отношении. 2. Безвредна по химическому составу и иметь благоприятные органолептические свойства. 3. Безопасна в радиационном отношении и иметь благоприятные органолептические свойства. 4. Безопасна в эпидемическом и радиационном отношении, безвредна по химическому составу и имеет благоприятные органолептические свойства. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
8	Водонапорная башня — это	1. Напорно-регулирующее сооружение, у которого бак размещен на поверхности земли. 2. Напорно-регулирующее сооружение, у которого бак размещен выше поверхности земли на искусственной опоре. 3. Напорно-регулирующее сооружение, у которого бак размещен ниже поверхности земли. 4. То же самое, что и пневматическая водоподъемная установка. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
9	Гидропневматические напорно-регулирующие установки выпускаются	1. Переменного давления. 2. Постоянного давления. 3. Избыточного давления. 4. Переменного и постоянного давления. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
10	Гидравлический таран — это	1. Машина, использующая для подъема воды энергию гидравлического удара, который периодически возникает в трубе подводящей воду к тарану от источника, расположенного выше тарана, но ниже резервуара, куда подается вода. 2. Гидравлическая машина, принцип работы которой основан на законе Паскаля. 3. Гидравлическая машина, принцип работы которой основан на законе сообщающихся сосудов. 4. Гидравлическая машина, использующая для подъема воды реактивное действие струи. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.

ВАРИАНТ № 2

№ п/п	Вопросы	Ответы
1	Водопровод — это	1. Последовательное расположение инженерных сооружений и устройств от источника до потребителя. 2. Взаимное расположение инженерных сооружений друг относительно друга. 3. Комплекс инженерных сооружений и устройств, осуществляющих получение воды из природных источников, ее очистку, транспортирование и подачу потребителям. 4. Система трубопроводов, предназначенных для подачи воды. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
2	Основные виды водоснабжения	1. Коммунальное, промышленное. 2. Коммунальное, промышленное, сельскохозяйственное. 3. Промышленное, сельскохозяйственное. 4. Коммунальное, сельскохозяйственное. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
3	Схема водоснабжения — это	1. Последовательное расположение инженерных сооружений и устройств от источника до потребителя. 2. Расположение инженерных сооружений друг относительно друга. 3. Взаимное расположение инженерных сооружений друг относительно друга. 4. Последовательное расположение инженерных сооружений и устройств от источника до потребителя, а также их взаимное расположение относительно друг друга. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
4	Удельное водопотребление — это	1. Потребление воды в течение суток в зависимости от графика водопотребления. 2. Распределение требуемого объема водопотребления во времени.

Продолжение табл.

№ п/п	Вопросы	Ответы
4	Удельное водопотребление — это	3. Количество воды, расходуемое потребителями в сутки. 4. Расход воды каким-либо потребителем за год. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
5	Минимальный коэффициент неравномерности $k_{\min \text{ сут}}$	1. Отношение минимального суточного расхода к среднесуточному. 2. Отношение минимального суточного расхода к максимальному суточному расходу. 3. Отношение максимального суточного расхода к минимальному суточному расходу. 4. Отклонение максимального суточного расхода от среднесуточного. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
6	Улучшение качества воды — это	1. Очистка ее от взвесей и бактерий, устранение цветности, привкусов, запахов, изменение состава растворенных в воде химических веществ. 2. Очистка ее от взвесей и бактерий, а также устранение цветности, привкусов, запахов. 3. Изменение состава растворенных в воде химических веществ. 4. Совокупность ее свойств, обусловленных характером и концентрацией содержащихся в воде примесей. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
7	В эпидемиологическом отношении безопасность питьевой воды определяется	1. Ее соответствием нормативам по микробиологическим показателям. 2. Ее соответствием нормативам по паразитологическим показателям. 3. Ее соответствием нормам радиационной безопасности по показателям общей α- и β-радиоактивности. 4. Ее соответствием нормативам по микробиологическим и паразитологическим показателям. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.

Продолжение табл.

№ п/п	Вопросы	Ответы
8	Минимальный свободный напор определяется	1. $h_{\text{св}} = 10 + 4 \cdot n$. 2. $h_{\text{св}} = 10 + 4 \cdot (n - 1)$. 3. $h_{\text{св}} = 10 - 4 \cdot (n - 1)$. 4. $h_{\text{св}} = 10 + 4 \cdot (n + 1)$. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
9	Воздушный водоподъемник (эрлифт) — это	1. Машина, использующая для подъема воды энергию гидравлического удара. 2. Устройство, применяемое для подачи жидкости с помощью сжатого воздуха на высоту. 3. Машина, использующая для подъема воды реактивное действие струи. 4. Машина, использующаяся для подъема воды, принцип действия которой основан на законе Паскаля. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
10	Машина, использующая для подъема воды энергию гидравлического удара, — это	1. Гидравлический пресс. 2. Эрлифт. 3. Водоструйная водоподъемная установка. 4. Гидравлический таран. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.

ВАРИАНТ № 3

№ п/п	Вопросы	Ответы
1	Система водоснабжения — это	1. Комплекс инженерных сооружений для получения воды из природных источников. 2. Комплекс инженерных сооружений для транспортирования и подачи воды потребителям. 3. Комплекс инженерных сооружений и устройств, осуществляющих получение воды из природных источников, ее очистку, транспортирование и подачу потребителям. 4. Комплекс инженерных сооружений и устройств, осуществляющих получение воды из природных источников, и ее очистку. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
2	Система водоснабжения включают в себя (правильным считается полный ответ)	1. Водозаборные сооружения, водоподъемные сооружения. 2. Насосные станции и сооружения для очистки воды. 3. Водоводы и водопроводные сети, башни и резервуары. 4. Водозаборные сооружения, водоподъемные сооружения, водоводы и водопроводные сети. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
3	Норма водопотребления — это	1. То же самое, что и удельное водопотребление. 2. Расход воды каким-либо потребителем за месяц. 3. Объем воды на одного человека в год. 4. Объем воды на тушение одного пожара. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
4	Объем водопотребления — это	1. Распределение требуемого объема водопотребления во времени. 2. Количество воды, потребляемое за определенный промежуток времени (час, сутки, сезон, год). 3. То же самое, что и удельное водопотребление.

Продолжение табл.

№ п/п	Вопросы	Ответы
4	Объем водопотребления — это	4. Объем бака водонапорной башни. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
5	Свободный напор — это	1. Пьезометрический напор в трубах, отсчитанный от свободной поверхности источника. 2. Высота, на которую может подняться вода в трубах над поверхностью земли в статическом состоянии. 3. Высота, на которую может подняться вода в трубах над поверхностью земли в динамическом состоянии. 4. Гидродинамический напор в трубах, отсчитанный от свободной поверхности источника. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
6	Обработка воды — это	1. Очистка ее от взвесей и бактерий, устранение цветности, привкусов, запахов, изменение состава растворенных в воде химических веществ. 2. Очистка ее от взвесей и бактерий, а также устранение цветности, привкусов, запахов. 3. Комплекс физических, химических и биологических методов изменения первоначального состава воды с целью сделать ее пригодной для хозяйственно-питьевых и производственных нужд. 4. Изменения первоначального состава воды. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
7	Радиационная безопасность питьевой воды	1. Должна соответствовать нормам радиационной безопасности по показателям общей α - и β -радиоактивности. 2. Определяется ее соответствием нормативам по микробиологическим и паразитологическим показателям. 3. Должна соответствовать нормам радиационной безопасности по показателям α -радиоактивности. 4. Должна соответствовать нормам радиационной безопасности по показателям β -радиоактивности. 5. Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.

Продолжение табл.

№ п/п	Вопросы	Ответы
8	Полный объем бака водонапорной башни равен	$W_6 = W_p + W_{\text{пож}} + W_{\text{авар}}$. $W_6 = (1,015 \dots 1,02) \cdot W_p$. $W_6 = (1,015 \dots 1,02) \cdot W_{\text{пож}} + W_p + W_{\text{авар}}$. $W_6 = (1,015 \dots 1,02) \cdot W_p + W_{\text{пож}} + W_{\text{авар}}$. - Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
9	Принцип действия воздушного водоподъемника (эрлифта) основан на	- Законе Архимеда. - Законе Паскаля. - Законах Ньютона. - Законе сообщающихся сосудов. - Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.
10	В зависимости от конструкции струйного аппарата и взаимного расположения напорного и водоподъемного трубопровода водоструйные установки разделяются на	- Двухлинейные с параллельным расположением трубопроводов; двухлинейные с концентрическим расположением труб; однолинейные. - Двухлинейные и однолинейные. - Дальнеструйные и среднеструйные. - Двухлинейные дальнеструйные; двухлинейные среднеструйные; однолинейные. - Верных ответов нет. Дайте свой правильный ответ.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Т а б л и ц а 1

Приставки для образования кратных и дольных единиц

Наименование	Обозначение	Множитель	Пример
Тера	Т	10^{12}	Тм (тераметр)
Гига	Г	10^9	Гм (гигаметр)
Мега	М	10^6	МПа (мегапаскаль)
Кило	к	10^3	кН (килоньютон)
Деци	д	10^{-1}	дм (дециметр)
Санتي	с	10^{-2}	см (сантиметр)
Милли	м	10^{-3}	мм (миллиметр)
Микро	мк	10^{-6}	мкм (микрометр)
Нано	н	10^{-9}	нм (нанометр)
Пико	п	10^{-12}	пм (пикометр)

Т а б л и ц а 2

Название букв греческого алфавита

Буква	Название буквы	Буква	Название буквы
Α α	альфа	Ν ν	ни (ню)
Β β	бета	Ξ ξ	кси
Γ γ	гамма	Ο ο	омикрон
Δ δ	дельта	Π π	пи
Ε ε	эпсилон	Ρ ρ	ро
Ζ ζ	дзета	Σ σ	сигма
Η η	эта	Τ τ	тау
Θ θ	тета	Υ υ	ипсилон
Ι ι	йота	Φ φ	фи
Κ κ	каппа	Χ χ	хи
Λ λ	лямбда	Ψ ψ	пси
Μ μ	ми (мю)	Ω ω	омега

Т а б л и ц а 3

Значение плотности воды при различных температурах

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$
0	999,87	20	998,26	70	977,94
3	999,99	30	995,76	80	971,94
4	1000	40	992,35	90	965,56
5	999,99	50	988,2	100	958,65
10	999,75	60	983,38	—	—

Т а б л и ц а 4

Кинематическая вязкость воды при различных температурах

$t, ^\circ\text{C}$	$\nu \cdot 10^{-6}, \text{м}^2/\text{с}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\nu \cdot 10^{-6}, \text{м}^2/\text{с}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\nu \cdot 10^{-6}, \text{м}^2/\text{с}$
0	1,79	16	1,11	60	0,48
6	1,47	18	1,06	70	0,42
8	1,38	20	1,01	80	0,37
10	1,31	30	0,81	90	0,33
12	1,23	40	0,66	100	0,29
14	1,17	50	0,56	—	—

Т а б л и ц а 5

Кинематическая вязкость некоторых жидкостей (и газов)

Жидкость (газ)	$t, ^\circ\text{C}$	$\nu, \text{см}^2/\text{с}$
Глицерин	20	0,041
Нефть	18	0,25
Масло	60	0,1
	100	0,035
Индустриальное масло ИС-30	20	2,7
Сухой воздух ($p = 98,1 \text{ кПа}$)	20	0,157

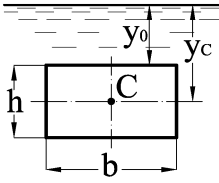
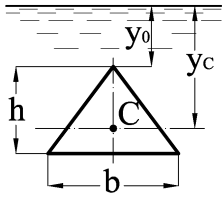
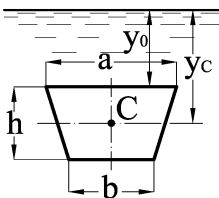
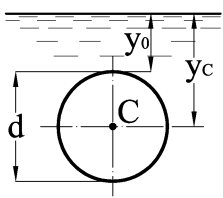
Т а б л и ц а 6

**Плотность и модуль объемной упругости
некоторых жидкостей и твердых тел**

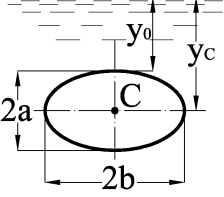
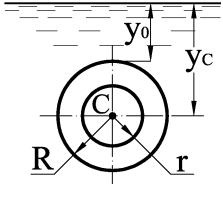
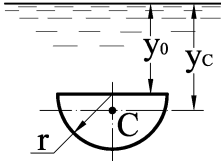
Жидкость или материал	Плотность ρ , кг/м^3	Модуль объемной упругости $E \cdot 10^8, \text{Па}$
Вода	1000	20
Нефть	850	13,24
Масло	920	13,5
Сталь	7800	2120
Чугун	7000	1150
Латунь	8500	1130
Бетон	2100	212
Поливинилхлорид (ПВХ)	1430	30
Медь	8900	1298

Т а б л и ц а 7

Моменты инерции I_0
(относительно горизонтальной оси,
проходящей через центр тяжести C),
координаты центра тяжести y_c
и площади ω некоторых плоских фигур

Расчетная схема		
Момент инерции I_0	$I_0 = \frac{bh^3}{12}$	$I_0 = \frac{bh^3}{36}$
Координата центра тяжести y_c	$y_c = y_0 + \frac{h}{2}$	$y_c = y_0 + \frac{2}{3}h$
Площадь ω	$\omega = bh$	$\omega = \frac{bh}{2}$
Расчетная схема		
Момент инерции I_0	$I_0 = \frac{h^3(a^2 + 4ab + b^2)}{36(a+b)}$	$I_0 = \frac{\pi d^4}{64}$
Координата центра тяжести y_c	$y_c = y_0 + \frac{h(a+2b)}{3(a+b)}$	$y_c = y_0 + \frac{d}{2}$
Площадь ω	$\omega = \frac{h(a+b)}{2}$	$\omega = \frac{\pi d^2}{4}$

Продолжение табл.

Расчетная схема		
Момент инерции I_0	$I_0 = \frac{\pi a^3 b}{4}$	$I_0 = \frac{\pi(R^4 - r^4)}{4}$
Координата центра тяжести y_c	$y_c = y_0 + a$	$y_c = y_0 + R$
Площадь ω	$\omega = \pi ab$	$\omega = \pi(R^2 - r^2)$
Расчетная схема		
Момент инерции I_0	$I_0 = \frac{9\pi^2 - 64}{72\pi} r^4$	
Координата центра тяжести y_c	$y_c = y_0 + \frac{4r}{3\pi}$	
Площадь ω	$\omega = \frac{\pi r^2}{2}$	

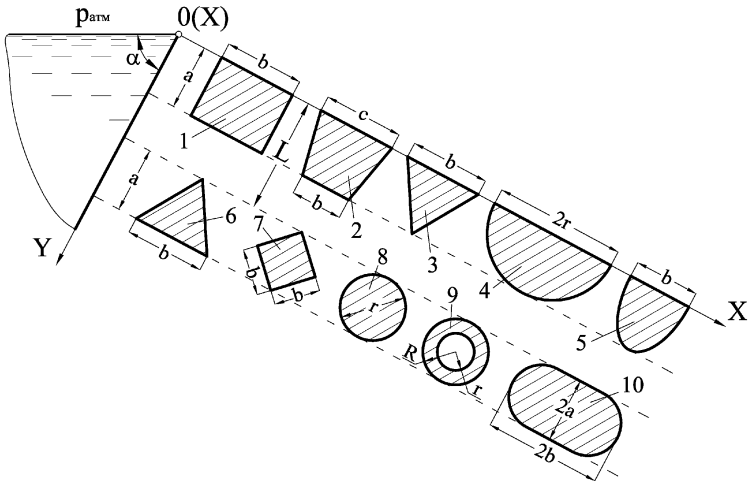


Рис. 1

Схемы к определению y_D и P некоторых фигур

Т а б л и ц а 8

**Силы гидростатического давления P
и расстояния от линии уреза жидкости до центра давления y_D
некоторых плоских фигур (к рисунку 1)**

№ схе- мы	Наименование схемы	P	y_D
1	Прямо- угольник и паралле- лограм с основа- нием b и высотой a	$P = \frac{1}{2} \gamma a^2 b \sin \alpha$	$y_D = \frac{2}{3} a$
2	Трапеция с основания- ми b и c и высотой a	$P = \frac{1}{6} \gamma a^2 (2b + c) \sin \alpha$	$y_D = \frac{a}{2} \cdot \frac{3b + c}{2b + c}$

Продолжение табл.

№ схе- мы	Наименование схемы	P	y_D
3	Треугольник (вершиной вниз) с осно- ванием b и высотой a	$P = \frac{1}{6} \gamma a^2 b \sin \alpha$	$y_D = \frac{a}{2}$
4	Полукруг радиусом r	$P = \frac{2}{3} \gamma r^3 \sin \alpha$	$y_D = \frac{3}{16} \pi r$
5	Параболиче- ский сегмент с основани- ем b и высо- той a	$P = \frac{4}{15} \gamma a^2 b \sin \alpha$	$y_D = \frac{4}{7} a$
6	Треугольник (вершиной вверх) с осно- ванием b и высотой a	$P = \frac{1}{16} \gamma a b (3L + 2a) \sin \alpha$	$y_D = L + \frac{4a(3L + 2a) + a^2}{6(3L + 2a)}$
7	Квадрат со стороной b и диагональю a	$P = \frac{1}{2} \gamma b^2 (a + 2L) \sin \alpha$	$y_D = L + \frac{3a(a + 2L) + b^2}{6(a + 2L)}$
8	Круг с радиусом r	$P = \gamma \pi r^2 (L + r) \sin \alpha$	$y_D = L + r + \frac{r^2}{4(L + r)}$
9	Кольцо с внешним радиусом R и внутренним радиусом r	$P = \gamma \pi (R^2 - r^2) \cdot (L + r) \sin \alpha$	$y_D = L + r + \frac{R^2 + r^2}{4(L + r)}$
10	Эллипс с го- ризонтальной осью $2b$ и вертикальной осью $2a$	$P = \gamma \pi a b (L + a) \sin \alpha$	$y_D = L + a + \frac{a^2}{4(L + a)}$

Т а б л и ц а 9

Значения коэффициентов истечения

Тип отверстия или насадка	Коэффициенты		
	ε	Ф	μ
Круглое отверстие в тонкой стенке	0,64	0,97	0,62
Внешний цилиндрический насадок	1,0	0,82	0,82
Внутренний цилиндрический насадок	1,0	0,71	0,71
Конически сходящийся насадок (угол конусности $\theta^\circ = 12...15^\circ$)	0,98	0,96	0,94
Конический расходящийся насадок (угол конусности $\theta^\circ = 5...7^\circ$)	1,0	0,45	0,45
Коноидальный насадок	1,0	0,97	0,97

Т а б л и ц а 10

**Давление насыщенных паров воды
в зависимости от температуры**

Температура, °С	–30	–20	–10	0	
Атмосферное давление, Па	50,5	125,6	279,6	612	
Температура, °С	10	20	30	40	50
Атмосферное давление, Па	1179	2336	4240	7360	12 320

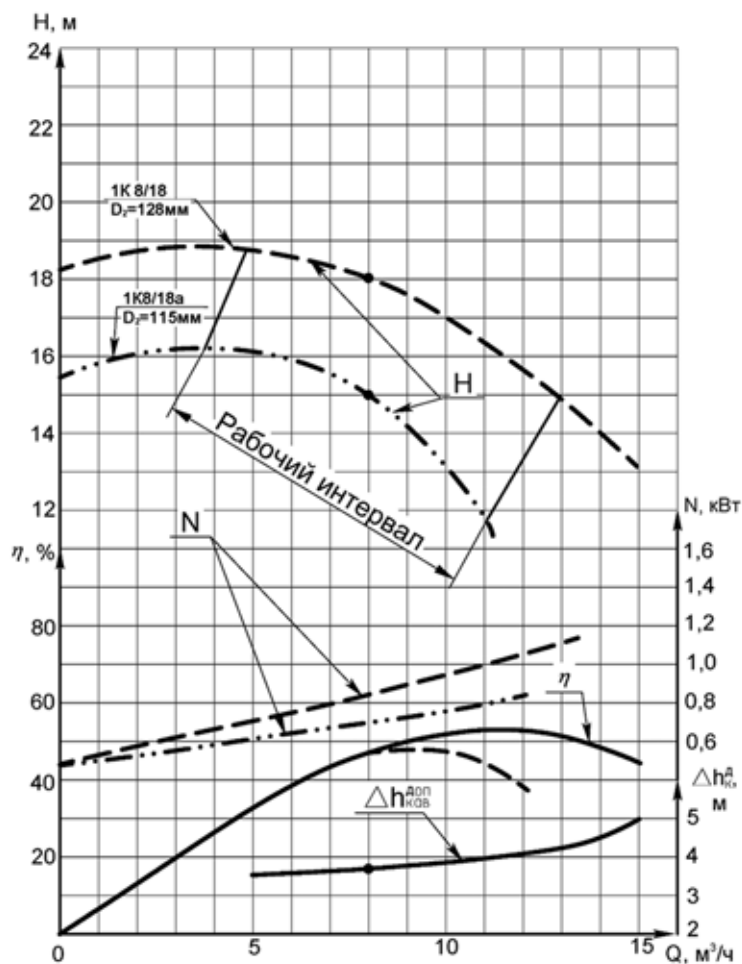


Рис. 2

Характеристика насоса 1K8/18
при частоте вращения 2900 об/мин

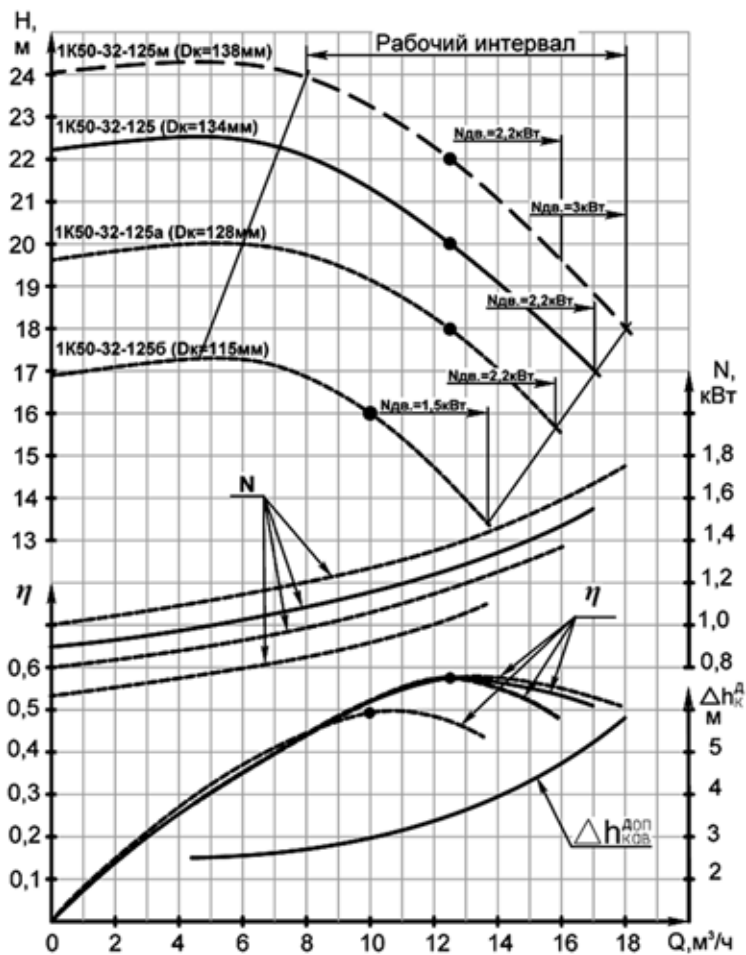


Рис. 3

Характеристика насоса 1K50-32-125
при частоте вращения 2900 об/мин

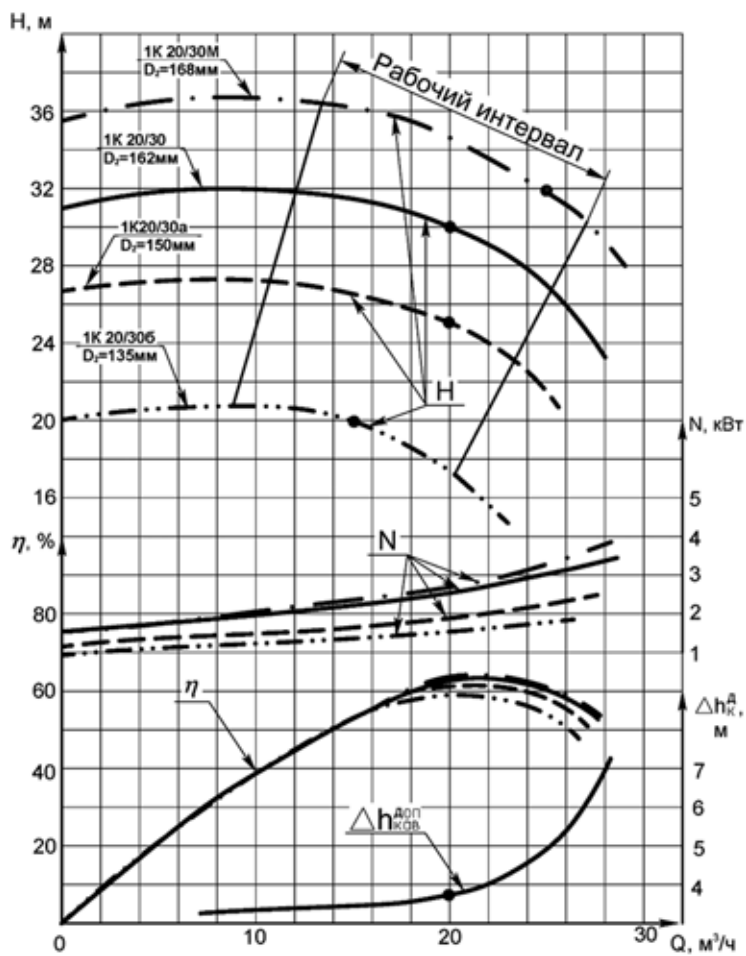


Рис. 4

Характеристика насоса 1K20/30
при частоте вращения 2900 об/мин

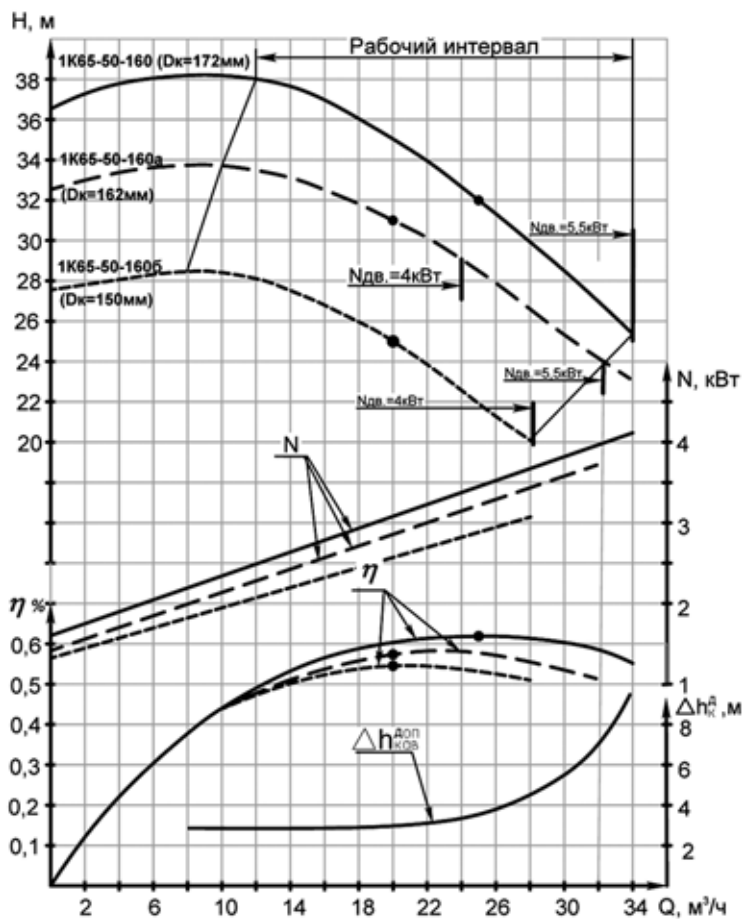


Рис. 5

Характеристика насоса 1K65-50-160
при частоте вращения 2900 об/мин

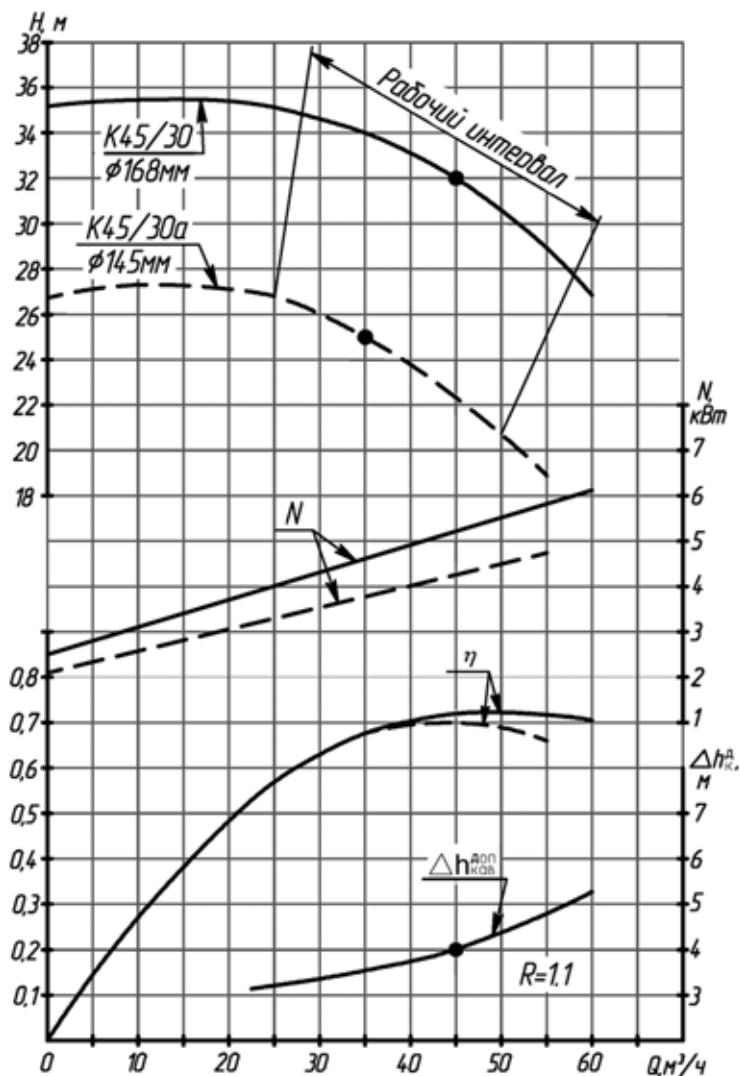


Рис. 6

Характеристика насоса K45/30
при частоте вращения 2900 об/мин

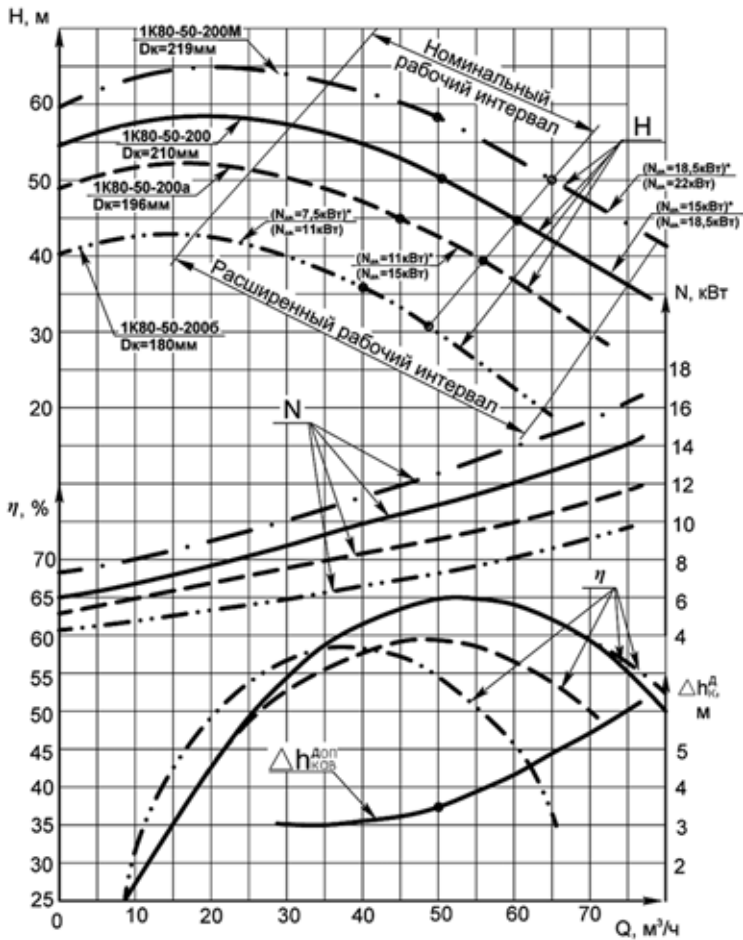


Рис. 7

Характеристика насоса 1K80-50-200
при частоте вращения 2900 об/мин

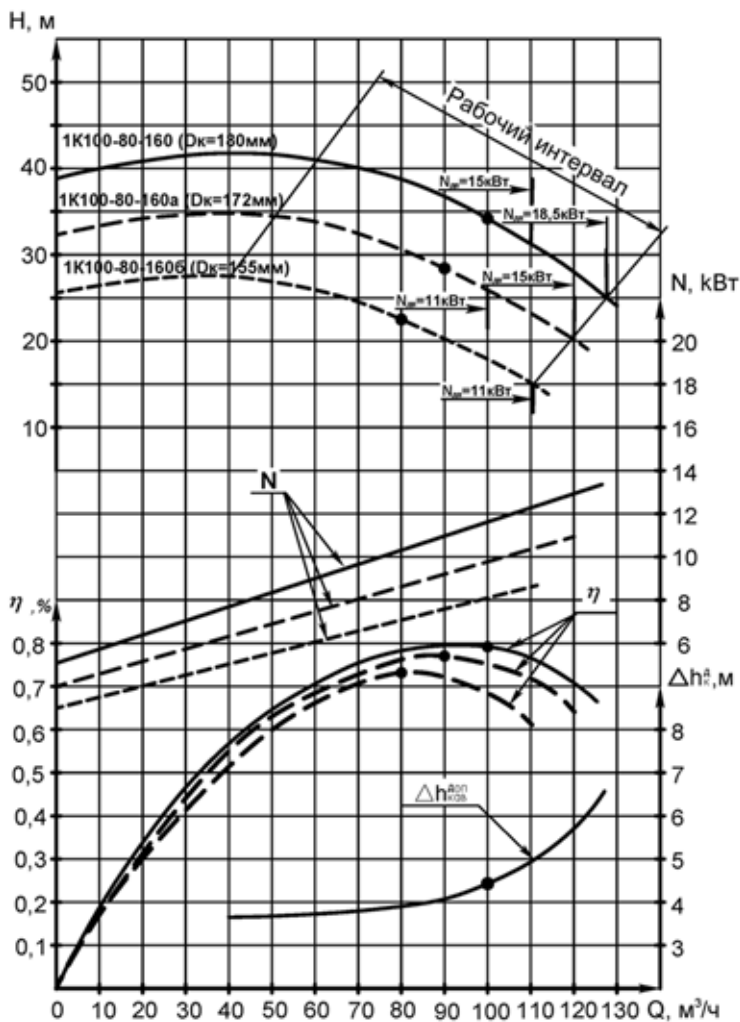


Рис. 8

Характеристика насоса 1K100-80-160
при частоте вращения 2900 об/мин

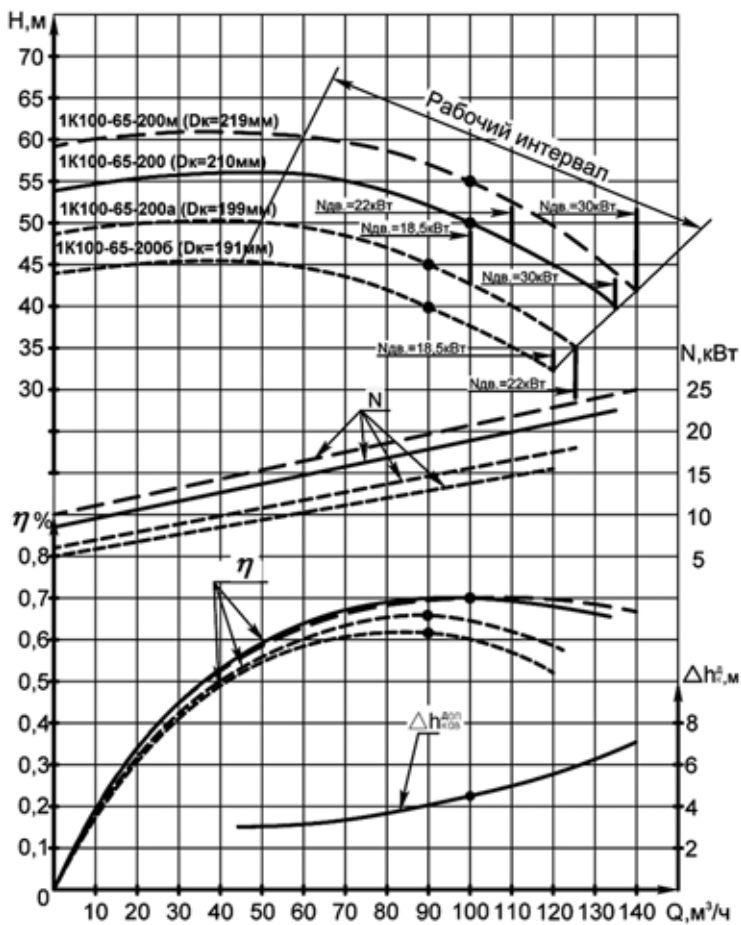


Рис. 9

Характеристика насоса 1K100-65-200
при частоте вращения 2900 об/мин

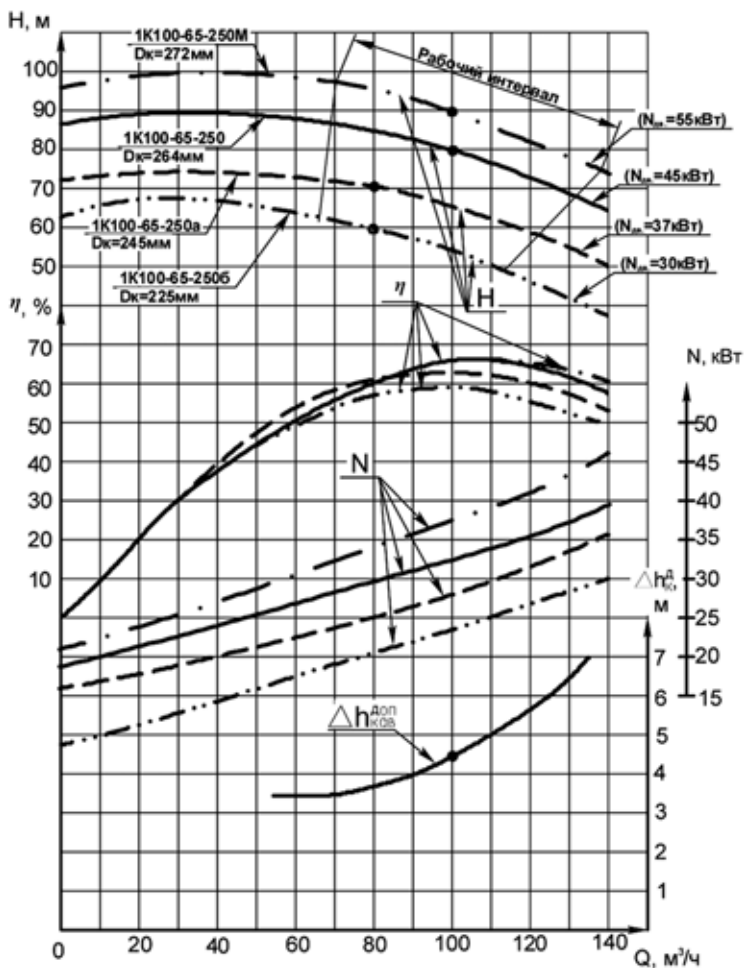


Рис. 10

Характеристика насоса 1K100-65-250
при частоте вращения 2900 об/мин

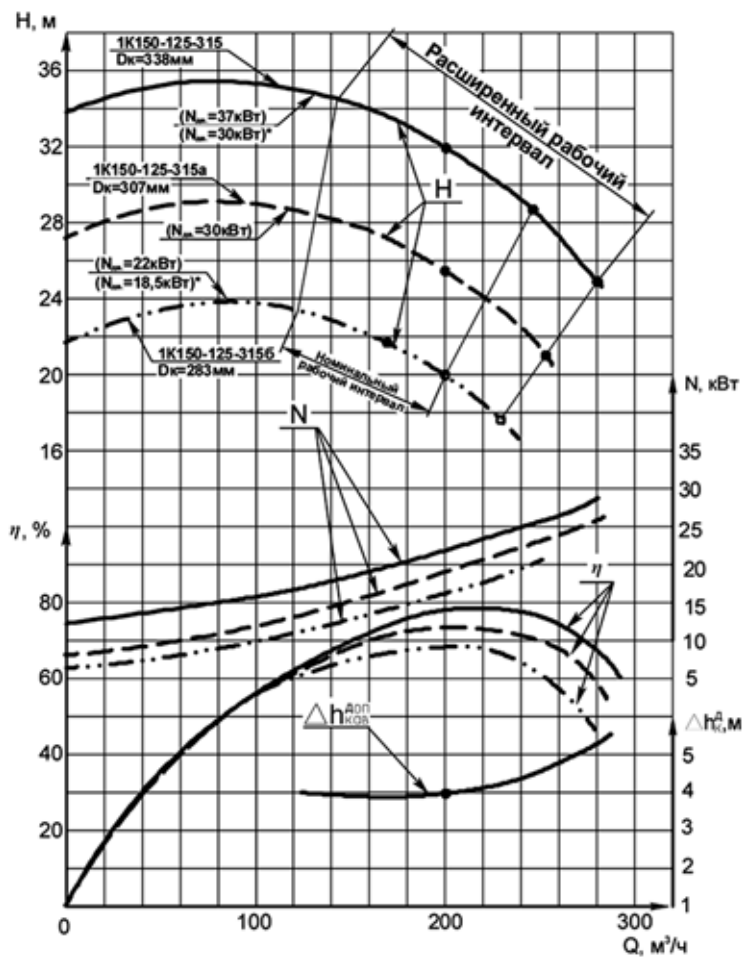


Рис. 11

Характеристика насоса 1K150-125-315
при частоте вращения 2900 об/мин

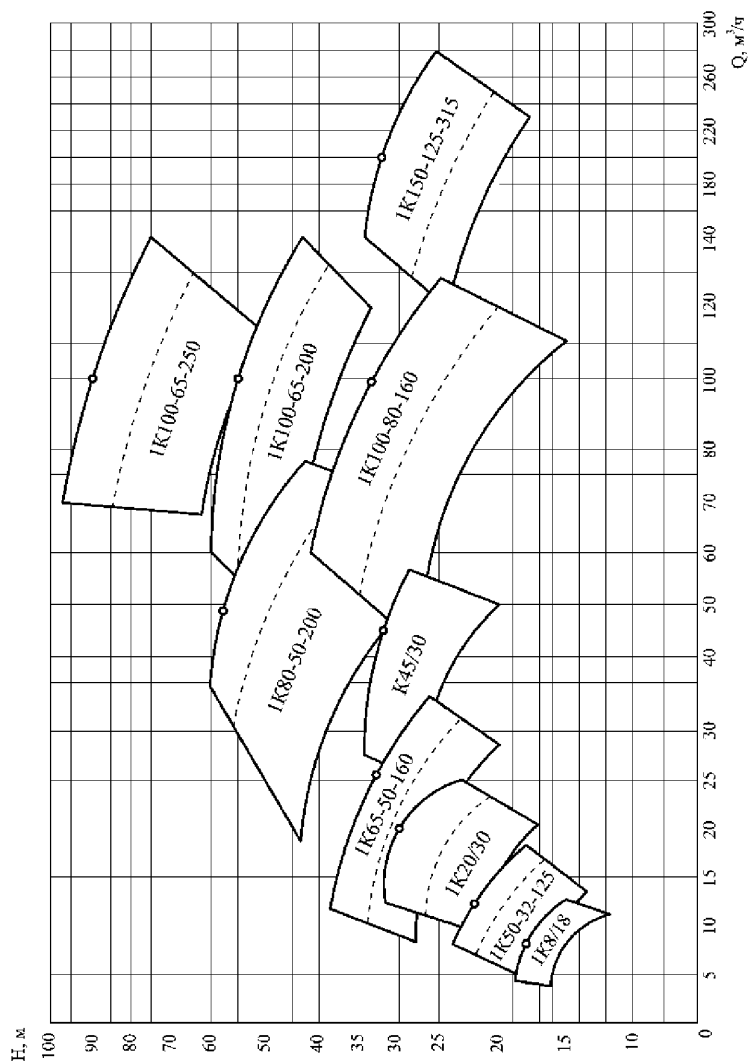


Рис. 12

Сводный график полей консольных насосов

Параметры насосно-силового оборудования

Типоразмер насоса	Двигатель			
	Марка	Мощность, кВт	Частота вращения, Гц (об/мин)	Напряжение, В
1К 8/18	АИР 71 В2	1,1	50 (3000)	220, 380
	АИР 80 А2	1,5		
1К 20/30	АИР 80 В2	2,2		
	АИР 90 L2	3,0		
	АИР 100 S2	4,0		
	АИР 100 L2	5,5		
1К50-32-125	АИР 80 А2	1,5		
	АИР 80 В2	2,2		
	АИР 90 L2	3,0		
1К65-50-160	АИР 100 S2	4,0		
	АИР 100 L2	5,5		
К 45/30	АИР 100 L2	5,5		
	АИР 112 М2	7,5		
1К80-50-200	АИР 132 М2	11		
	АИР 160 S2	15		
	АИР 160 М2	18,5		
	АИР 180 S2	22		
1К100-65-200	АИР 160 М2	18,5		
	АИР 180 S2	22		
	АИР 180 М2	30		
	АИР 200 М2	37		
1К100-65-250	АИР 200 М2	37		
	АИР 200 L2	45		
	АИР 225 М2	55		
1К100-80-160	АИР 132 М2	11		
	АИР 160 S2	15		
	АИР 160 М2	18,5		
1К150-125-315	АИР 180 S2	22		
	АИР 180 М2	30		
	АИР 200 М2	37		

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрамов, Н. Н.* Водоснабжение. — М. : Стройиздат, 1982. — 440 с.
2. *Анакин, И. А.* Практикум по механизации животноводства. — М. : Сельхозиздат, 1962. — 159 с.
3. *Альтшуль, А. Д.* Гидравлика и аэродинамика (Основы механики жидкости) / А. Д. Альтшуль, П. Г. Киселев. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Стройиздат, 1975. — 323 с.
4. *Башта, Т. М.* Гидравлика, гидромашины и гидроприводы / Т. М. Башта [и др.]. — 2-е изд. — М. : Машиностроение, 1983. — 423 с.
5. *Берл, Джон.* Инженерная математика : карманный справочник ; пер. с англ. — М. : Издательский дом «Додэка-XXI», 2008. — 544 с. (Серия «Карманный справочник»).
6. *Бешелев, С. Д.* Математико-статистические методы экспертных оценок / С. Д. Бешелев, Ф. Г. Гурвич. — М. : Статистика, 1974. — 159 с.
7. *Бобровский, С. А.* Гидравлика, насосы и компрессоры / С. А. Бобровский, С. М. Соколовский. — М. : Недра, 1972. — 296 с.
8. *Богомолов, А. И.* Гидравлика / А. И. Богомолов, К. А. Михайлов. — М. : Стройиздат, 1972. — 648 с.
9. *Вильнер, Я. М.* Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам / Я. М. Вильнер, Я. Т. Ковалев, Б. Б. Некрасов ; под ред. Б. Б. Некрасова. — Минск : Вышэйш. школа, 1976. — 416 с.
10. *Константинов, Н. М.* Гидравлика, гидрология, гидрометрия : учебник. В 2 ч. Ч. 1. Общие законы / Н. М. Константинов, Н. А. Петров, Л. И. Высоцкий ; под ред. Н. М. Константинова. — М. : Высш. шк., 1987. — 304 с.
11. *Гиргидов, А. Д.* Механика жидкости и газа (гидравлика) : учебник. — СПб. : Изд-во СПбГПУ, 2002. — 545 с.
12. ГОСТ 15528-86. Средства измерений расхода, объема или массы протекающих жидкости и газа. Термины и определения. — М. : Госстандарт СССР, 1987. — С. 41.
13. ГОСТ 17398-72. Насосы. Термины и определения. — М. : Госстандарт СССР, 1987. — С. 36.
14. *Журба, М. Г.* Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений : учеб. пособие. Т. 3 ; 3-е изд., перераб. и доп. / М. Г. Журба, Л. И. Соколов, Ж. М. Говорова. — М. : АСВ, 2010. — 408 с.
15. *Земцов, В. М.* Гидравлика : учеб. пособие. — М. : АСВ, 2007. — 352 с.
16. *Исаев, А. П.* Методические указания к лабораторной работе «Испытание шестеренного насоса» для студентов 3 курса факультетов «Механизация сельского хозяйства» и ТС АПК / А. П. Исаев, Н. Г. Сапожников, В. Ф. Озерин [и др.]. — М. : МИИСП, 1992. — 11 с.
17. *Исаев, А. П.* Гидравлика : учебник / А. П. Исаев, Н. Г. Кожевникова, А. В. Ещин. — М. : НИЦ ИНФРА-М, 2015. — 420 с.
18. *Исаев, А. П.* Гидравлика, гидравлические машины и сельскохозяйственное водоснабжение : методические указания по выполнению лабо-

- раторных работ. Ч. 3 / А. П. Исаев, Н. Г. Кожевникова, Б. Т. Бекишев [и др.]. — М. : МГАУ, 2002. — 50 с.
19. *Исаев, А. П.* Насосы. Методическое пособие / А. П. Исаев, Н. Г. Кожевникова, В. Ф. Кривчанский [и др.]. — М. : ФГБОУ ВПО МГАУ, 2008. — 80 с.
 20. *Калекин, А. А.* Гидравлика и гидравлические машины. — М. : Мир, 2005. — 512 с.
 21. *Карелин, В. Я.* Насосы и насосные станции : учебник / В. Я. Карелин, А. В. Минаев. — М. : Стройиздат, 1986. — 320 с.
 22. *Карамбиров, Н. А.* Сельскохозяйственное водоснабжение. — М. : Колос, 1986. — 416 с.
 23. *Канторович, Б. В.* Гидравлика, водоснабжение и гидросиловые установки / Б. В. Канторович, Н. К. Кузнецов. — М. : Сельхозиздат, 1961. — 551 с.
 24. *Казарновский, Ю. Э.* Насосы. Программированное учебное пособие. — М. : МИИСП, 1969. — 116 с.
 25. *Косой, В. Д.* Пособие для лабораторных и практических занятий по курсу «Гидравлика». — М. : ДеЛи принт, 2007. — 552 с.
 26. *Иванов, А. И.* Контрольно-измерительные приборы в сельском хозяйстве : справочник / А. И. Иванов, А. А. Куликов, Б. С. Третьяков. — М. : Колос, 1984. — 352 с.
 27. *Кожевникова, Н. Г.* Практикум по гидравлике / Н. Г. Кожевникова, Н. П. Тогунова, А. В. Ещин [и др.]. — М. : НИЦ ИНФРА-М, 2014. — 428 с.
 28. *Кожевникова, Н. Г.* Гидравлика, гидравлические машины и сельскохозяйственное водоснабжение : лабораторный практикум. Ч. 3. Гидравлические машины / Н. Г. Кожевникова, А. В. Ещин, В. Ф. Кривчанский [и др.]. — М. : ФГОУ ВПО МГАУ, 2010. — 68 с.
 29. *Кожевникова, Н. Г.* Гидравлика, гидравлические машины и сельскохозяйственное водоснабжение : лабораторный практикум. Ч. 4. Водоснабжение / Н. Г. Кожевникова, А. В. Ещин, Н. А. Шевкун [и др.]. — М. : ФГБОУ ВПО МГАУ, 2011. — 68 с.
 30. *Кожевникова, Н. Г.* Гидравлика, гидромашины и сельскохозяйственное водоснабжение : лабораторный практикум. Ч. 1. Гидростатика / Н. Г. Кожевникова, Н. П. Тогунова, А. В. Ещин [и др.]. — М. : ФГБОУ ВПО МГАУ, 2012. — 56 с.
 31. *Кожевникова, Н. Г.* Гидравлические машины и сельскохозяйственное водоснабжение : лабораторный практикум. Ч. 2. Гидродинамика. Основные сведения о движении жидкости. Гидравлические сопротивления / Н. Г. Кожевникова, Н. П. Тогунова, А. В. Ещин [и др.]. — М. : ФГБОУ ВПО МГАУ, 2013. — 72 с.
 32. *Кожевникова, Н. Г.* Гидравлические машины и сельскохозяйственное водоснабжение : лабораторный практикум. Ч. 2. Гидродинамика. Основы гидравлики трубопроводов / Н. Г. Кожевникова, Н. П. Тогунова, А. В. Ещин [и др.]. — М. : ФГБОУ ВПО РГАУ–МСХА им. К. А. Тимирязева, 2014. — 56 с.
 33. *Кремлевский, П. П.* Расходомеры и счетчики количества вещества : справочник. Кн. 1. — СПб. : Политехника, 2002. — 409 с.
 34. *Кремлевский, П. П.* Расходомеры и счетчики количества вещества : справочник. Кн. 2 ; под общ. ред. Е. А. Шорникова. — СПб. : Политехника, 2004. — 412 с.
 35. *Лапшов, Н. Н.* Гидравлика. — М. : Академия, 2008. — 272 с.
 36. *Манькин, А. Н.* Автоматизация процессов водоснабжения в сельском

- хозяйстве / А. Н. Маныкин, И. Ф. Булыга. — Минск : Урожай, 1988. — 72 с.
37. Оводов, В. С. Сельскохозяйственное водоснабжение. — М. : Колос, 1982. — 412 с.
38. Овселян, В. М. Гидравлический таран и таранные установки. — М. : Машиностроение, 1968. — 124 с.
39. Осипов, П. Е. Гидравлика, гидравлические машины и гидропривод : учебное пособие. 3-е изд., перераб. и доп. — М. : Лесн. пром-сть, 1981. — 424 с.
40. Панова, М. В. Лабораторный практикум по гидравлике. — М. : Энергия, 1969. — 128 с.
41. Палишкин, Н. А. Гидравлика и сельскохозяйственное водоснабжение : учебник. — М. : Агропромиздат, 1990. — 351 с.
42. Платунов, Е. С. Физика : словарь-справочник / Е. С. Платунов, В. А. Самолётов, С. Е. Буравой. — СПб. : Питер, 2005. — 496 с.
43. Советский энциклопедический словарь / гл. ред. А. М. Прохоров. 3-е изд. — М. : Советская энциклопедия, 1984. — 1600 с.
44. Стесин, С. П. Гидравлика, гидромашин и гидро-пневмоприводы / С. П. Стесин, Т. В. Артемьева, Т. М. Лысенко [и др.]. — М. : Изд. центр «Академия», 2005. — 336 с.
45. Яворский, Б. М. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф, А. К. Лебедев. — 8-е изд., перераб. и испр. — М. : ООО «Издательство Оникс» ; ООО «Издательство «Мир и Образование», 2007. — 1056 с.
46. Тепло- и водоснабжение сельского хозяйства / под ред. С. П. Рудобашты. — М. : Колос, 1997. — 509 с.
47. Усаковский, В. М. Водоснабжение и водоотведение в сельском хозяйстве. — М. : Колос, 2002. — 328 с.
48. Ухин, Б. В. Гидравлика : учебное пособие. — М. : ИД «ФОРУМ» : ИНФРА-М, 2011. — 320 с.
49. Ухин, Б. В. Гидравлические машины. Насосы, вентиляторы, компрессоры и гидропривод. — М. : ИД «ФОРУМ» : ИНФРА-М, 2009. — 464 с.
50. Флексер, Я. Н. Практикум по гидравлике и сельскохозяйственному водоснабжению. — М. : Колос, 1969. — 256 с.
51. Хансуваров, К. И. Техника измерения давления, расходов, количества и уровня жидкости, газа и пара : учеб. пособие / К. И. Хансуваров, В. Г. Цейтлин. — М. : Изд-во стандартов, 1990. — 287 с.
52. Штеренлихт, Д. В. Гидравлика : учебник. 5-е изд., стер. — СПб. : Лань, 2015. — 656 с.
53. Яблонский, В. С. Краткий курс технической гидромеханики. — М. : Изд-во физико-математической литературы, 1961. — 356 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
Методические указания к подготовке и выполнению лабораторных работ. Общие требования и правила оформления	8
Краткие сведения о международной системе единиц измерения (СИ)	11
Обработка результатов измерений	12
Инструкция по охране труда при выполнении лабораторных работ	15
1. Общие требования охраны труда	15
2. Требования охраны труда перед началом работы	16
3. Требования охраны труда во время работы	16
4. Требования охраны труда в аварийных ситуациях	17
5. Требования охраны труда по окончании работы	18
Часть 1. Гидростатика	
<i>Лабораторная работа № 1.1</i>	
Основные физические свойства жидкости	20
Цель работы	20
Общие сведения по теме работы	20
Описание приборов для измерения плотности (удельного веса) и вязкости жидкостей	25
Приборы для определения удельного веса и плотности жидкостей	25
Порядок проведения работы и обработка опытных данных	31
Определение плотности и удельного веса жидкости с помощью пикнометра	31
Определение плотности и удельного веса жидкости с помощью сообщающихся сосудов	33
Определение плотности жидкости с помощью ареометра	34
Определение вязкости жидкости с помощью капиллярного вискозиметра Пинкевича (ВПЖ-4)	36
Контрольные вопросы	37

*Лабораторная работа № 1.2***Гидростатическое давление.**

Методы и средства для измерения давления	38
Цель работы	38
Общие сведения по теме работы	38
Жидкостные приборы	44
Деформационные приборы	49
Грузопоршневые манометры	52
Электрические приборы	54
Описание экспериментальной установки	57
Порядок проведения работы и обработка опытных данных	58
Контрольные вопросы	61

Лабораторная работа № 1.3

Исследование закона Паскаля	62
Цель работы	62
Основные сведения по теме работы	62
Описание экспериментальной установки	66
Порядок проведения работы и обработка опытных данных	68
Наглядная демонстрация закона Паскаля	68
Исследование закона Паскаля на примере гидравлического пресса	69
Контрольные вопросы	70

*Лабораторная работа № 1.4***Определение силы гидростатического давления**

на плоскую стенку	71
Цель работы	71
Основные сведения по теме работы	71
Описание экспериментальной установки	73
Порядок проведения работы и обработка опытных данных	75
Контрольные вопросы	77

Лабораторная работа № 1.5

Определение силы Архимеда	78
Цель работы	78
Основные сведения по теме работы	78
Описание экспериментальной установки	80
Порядок проведения работы и обработка опытных данных	80
Контрольные вопросы	81

*Лабораторная работа № 1.6***Определение формы свободной поверхности жидкости**

во вращающемся цилиндрическом сосуде	82
Цель работы	82
Основные сведения по теме работы	82
Описание экспериментальной установки	85
Порядок проведения работы и обработка опытных данных	86
Контрольные вопросы	87

Примеры тестовых заданий для текущего контроля «Физические свойства жидкости и гидростатика».	
Карточка рубежного контроля	90
Вариант № 1	90
Вариант № 2	93
Вариант № 3	96
Часть 2. Гидродинамика	99
<i>Лабораторная работа № 2.1</i>	
Исследование уравнения Бернулли	100
Цель работы	100
Основные сведения по теме работы	100
Описание экспериментальной установки	104
Порядок проведения работы	107
Обработка опытных данных	108
Контрольные вопросы	110
<i>Лабораторная работа № 2.2</i>	
Исследование режимов движения жидкости.	
Определение числа Рейнольдса	111
Цель работы	111
Основные сведения по теме работы	111
Описание экспериментальной установки	113
Порядок проведения работы	115
Обработка опытных данных	115
Контрольные вопросы	116
<i>Лабораторная работа № 2.3</i>	
Определение коэффициента гидравлического трения по длине трубы	118
Цель работы	118
Основные сведения по теме работы	118
Описание экспериментальной установки	124
Порядок проведения работы	125
Обработка опытных данных	125
Контрольные вопросы	129
<i>Лабораторная работа № 2.4</i>	
Определение коэффициентов местных сопротивлений	130
Цель работы	130
Основные сведения по теме работы	130
Описание экспериментальной установки	136
Порядок проведения работы	136
Обработка опытных данных	136
Контрольные вопросы	140
<i>Лабораторная работа № 2.5</i>	
Определение коэффициентов расхода, сжатия и скорости при истечении жидкости из отверстий и насадков	141
Цель работы	141
Основные сведения по теме работы	141
Описание экспериментальной установки	151

Порядок проведения работы	151
Обработка опытных данных	154
Контрольные вопросы	156
<i>Лабораторная работа № 2.6</i>	
Методы определения расхода жидкости. Расходомеры	157
Цель работы	157
Основные сведения по теме работы	157
Описание экспериментальной установки	172
Порядок проведения работы	175
Обработка опытных данных	175
Контрольные вопросы	177
<i>Лабораторная работа № 2.7</i>	
Исследование гидравлического удара	
в напорном трубопроводе	178
Цель работы	178
Основные сведения по теме работы	178
Описание экспериментальной установки	181
Порядок проведения работы	184
Обработка опытных данных	184
Контрольные вопросы и задания	186
Примеры тестовых заданий для текущего контроля	
«Гидродинамика».	
Карточка рубежного контроля	188
Вариант № 1	188
Вариант № 2	191
Вариант № 3	194
Часть 3. Гидравлические машины	
<i>Лабораторная работа № 3.1</i>	
Испытание центробежного насоса	198
Цель работы	198
Общие сведения по теме работы	198
Описание экспериментальной установки	203
Порядок проведения работы	203
Обработка опытных данных	205
Контрольные вопросы и задания	207
<i>Лабораторно-практическая работа № 3.2</i>	
Построение характеристики трубопровода	208
Цель работы	208
Основные сведения по теме работы	208
Пример построения характеристики трубопровода	210
Задание для самостоятельной работы	212
Контрольные вопросы и задания	214
<i>Лабораторная работа № 3.3</i>	
Параллельная и последовательная работа насосов	215
Цель работы	215
Основные сведения по теме работы	215
Порядок проведения работы	218

Обработка опытных данных	218
Обработка опытных данных	219
Контрольные вопросы и задания	221
<i>Лабораторно-практическая работа № 3.4</i>	
Подбор насоса по каталогу	222
Цель работы	222
Основные сведения по теме работы	222
Пример подбора насоса по сводному графику рабочих полей	224
Задание для самостоятельной работы	225
Контрольные вопросы и задания	226
<i>Лабораторная работа № 3.5</i>	
Кавитационные испытания центробежного насоса	227
Цель работы	227
Общие сведения по теме работы	227
Порядок проведения работы	234
1. Построение частных кавитационных характеристик	234
Обработка опытных данных	234
2. Построение кавитационной характеристики	237
Контрольные вопросы	240
<i>Лабораторная работа № 3.6</i>	
Испытание шестеренного насоса	241
Цель работы	241
Общие сведения по теме работы	241
Описание экспериментальной установки	244
Порядок проведения работы	247
Обработка опытных данных	248
Контрольные вопросы	249
Примеры тестовых заданий для текущего контроля	
«Гидравлические машины». Карточка рубежного контроля	252
Вариант № 1	252
Вариант № 2	255
Вариант № 3	258
Часть 4. Водоснабжение	
<i>Лабораторная работа № 4.1</i>	
Изучение работы водоструйной водоподъемной установки	264
Цель работы	264
Основные сведения по теме работы	264
Описание экспериментальной установки	267
Порядок проведения работы	267
Обработка опытных данных	269
Контрольные вопросы	270
<i>Лабораторная работа № 4.2</i>	
Изучение работы воздушного водоподъемника (Эрфлита)	271
Цель работы	271
Основные сведения по теме работы	271

Описание экспериментальной установки	276
Порядок проведения работы	276
Обработка опытных данных	278
Контрольные вопросы	279
<i>Лабораторная работа № 4.3</i>	
Изучение работы автоматизированной пневматической	
водоподъемной установки	280
Цель работы	280
Основные сведения по теме работы	280
Описание экспериментальной установки	284
Порядок проведения работы	286
Обработка опытных данных	287
Контрольные вопросы	288
<i>Лабораторная работа № 4.4</i>	
Экспериментальное исследование рабочего процесса	
гидравлического тарана	290
Цель работы	290
Основные сведения по теме работы	290
Описание экспериментальной установки	294
Порядок проведения работы	295
Обработка опытных данных	297
Контрольные вопросы и задания	299
<i>Лабораторная работа № 4.5</i>	
Исследование работы дождевального аппарата	301
Цель работы	301
Основные сведения по теме работы	301
Описание экспериментальной установки	306
Порядок проведения работы	307
Обработка опытных данных	307
Контрольные вопросы	309
Примеры тестовых заданий для текущего контроля	
«Водоснабжение». Карточка рубежного контроля	312
Вариант № 1	312
Вариант № 2	315
Вариант № 3	318
Приложение	321
Список литературы	341

*Наталья Георгиевна КОЖЕВНИКОВА
Александр Вадимович ЕЩИН
Николай Александрович ШЕВКУН
Александр Владимирович ДРАНЫЙ
Владимир Александрович ШЕВКУН
Александр Андреевич ЦЫМБАЛ
Борис Тимофеевич БЕКИШЕВ*

**ГИДРАВЛИКА
И ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ МАШИНЫ.
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

Учебное пособие

Зав. редакцией
инженерно-технической литературы *Т. Ф. Гаврильева*
Ответственный редактор *Н. В. Черезова*
Верстка *Е. Е. Егорова*
Выпускающие *Е. П. Королькова, Н. А. Крылова*

ЛР № 065466 от 21.10.97
Гигиенический сертификат 78.01.10.953.П.1028
от 14.04.2016 г., выдан ЦГСЭН в СПб

Издательство «ЛАНЬ»
lan@lanbook.ru; www.lanbook.com
196105, Санкт-Петербург, пр. Юрия Гагарина, д. 1, лит. А.
Тел./факс: (812) 336-25-09, 412-92-72.
Бесплатный звонок по России: 8-800-700-40-71

Подписано в печать 22.04.16.
Бумага офсетная. Гарнитура Школьная. Формат 84×108^{1/32}.
Печать офсетная. Усл. п. л. 18,48. Тираж 200 экз.

Заказ № 110-16.
Отпечатано в полном соответствии с качеством
предоставленного оригинал-макета.
в ПАО «Т8 Издательские Технологии».
109316, г. Москва, Волгоградский пр., д. 42, к. 5.

ГДЕ КУПИТЬ

ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИЙ:

Для того, чтобы заказать необходимые Вам книги,
достаточно обратиться в любую из торговых компаний
Издательского Дома «ЛАНЬ»:

по России и зарубежью

«ЛАНЬ-ТРЕЙД»

192029, Санкт-Петербург, ул. Крупской, 13

тел.: (812) 412-85-78, 412-14-45, 412-85-82

тел./факс: (812) 412-54-93

e-mail: trade@lanbook.ru

ICQ: 446-869-967

www.lanpbl.spb.ru/price.htm

в Москве и в Московской области

«ЛАНЬ-ПРЕСС»

109263, Москва, 7-ая ул. Текстильщиков, д. 6/19

тел.: (499) 178-65-85

e-mail: lanpress@lanbook.ru

в Краснодаре и в Краснодарском крае

«ЛАНЬ-ЮГ»

350901, Краснодар, ул. Жлобы, д. 1/1

тел.: (861) 274-10-35

e-mail: lankrd98@mail.ru

ДЛЯ РОЗНИЧНЫХ ПОКУПАТЕЛЕЙ:

интернет-магазин

Издательство «Лань»: <http://www.lanbook.com>

магазин электронных книг

Global F5

<http://globalf5.com/>



**ЕСТЕСТВЕННОНАУЧНАЯ
ЛИТЕРАТУРА
ДЛЯ ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ**

Мы издаем новые
и ставшие классическими учебники
и учебные пособия по общим
и общепрофессиональным
направлениям подготовки.

Большая часть литературы
издательства «ЛАНЬ»
рекомендована Министерством образования
и науки РФ и используется вузами
в качестве обязательной.

Мы активно сотрудничаем
с представителями высшей школы,
научно-методическими советами
Министерства образования и науки РФ,
УМО по различным направлениям
и специальностям по вопросам грифования,
рецензирования учебной литературы
и формирования перспективных планов издательства.

Наши адреса и телефоны:

РФ, 196105, Санкт-Петербург, пр. Юрия Гагарина, 1
(812) 336-25-09, 412-92-72
www.lanbook.com